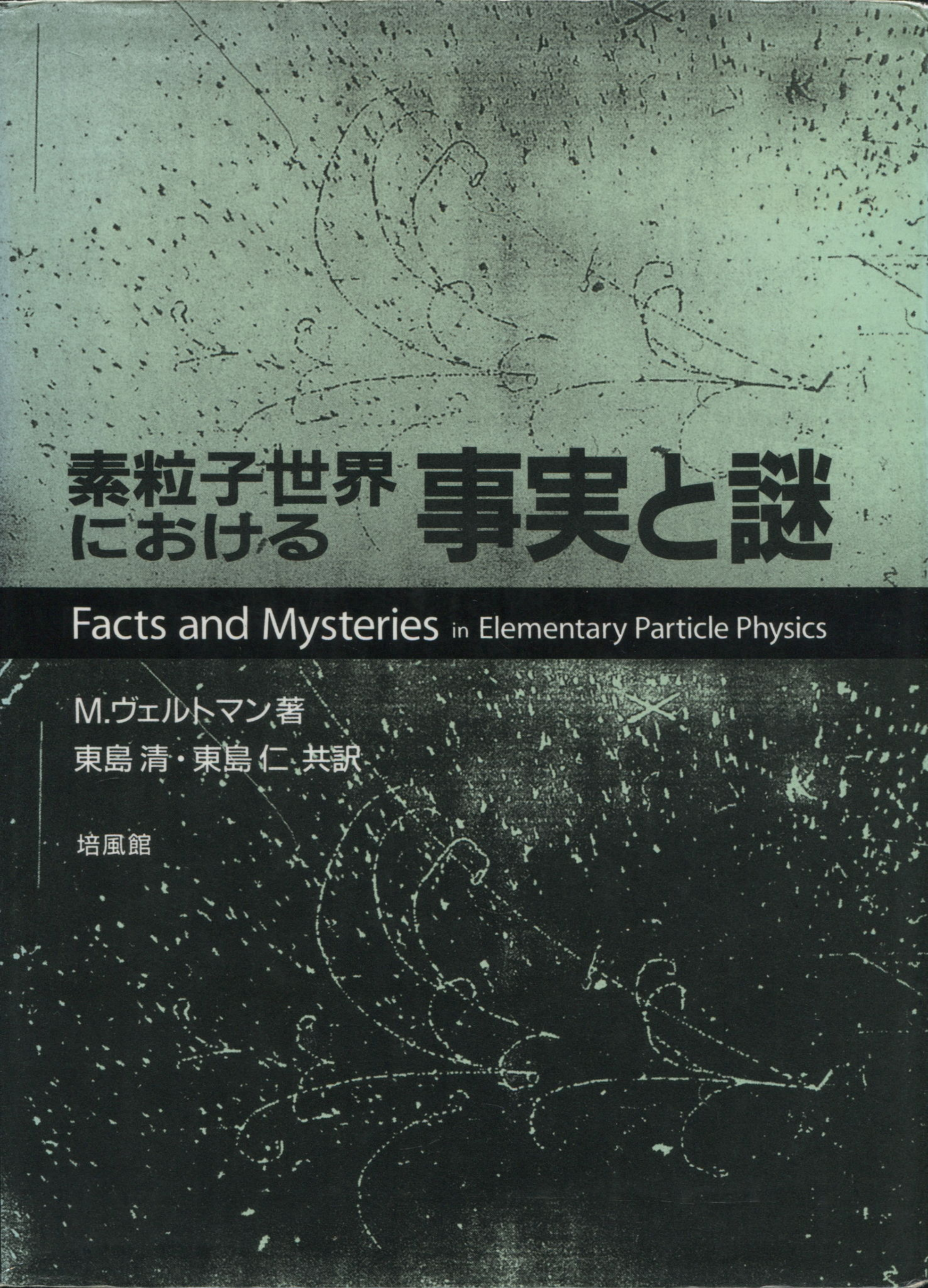


素粒子世界における 事実と謎

Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics

M.ヴェルトマン著

東島 清・東島 仁 共訳

培風館

素粒子世界における
事実と謎

Facts and Mysteries
in
Elementary Particle Physics

M.ヴェルトマン著
東島 清・東島 仁 共訳

培風館

Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics

by
Martinus Veltman

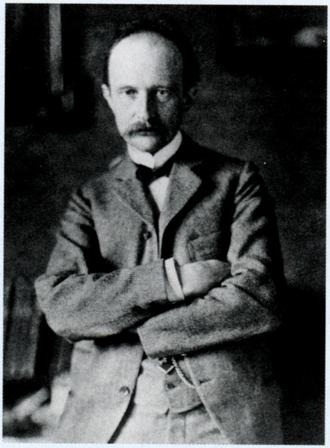
目　次

まえがき

20世紀，物理学は途方もない発展を遂げた。前半には，相対性理論，アインシュタインの重力理論，それに量子力学が隆盛をきわめ，後半には素粒子物理学が勃興した。もちろん，物理学のほかの分野でも，かなりの進歩があったことは確かだ。だが，超伝導の発見と関連理論の発展などは，学問の幅を広げるという意味の発展であり，深める意味の発展ではなかった。つまり，これらの発展によって，自然界の基本法則に対する我々の理解が変わるわけではない。同じように低温物理や統計力学の研究者たちも，自分たちの分野の発展がどれほど重要だったとしても，量子力学そのものに対する基本的な理解を変化させる影響力をもつとは考えていない。

これらの発展の道筋において，ある微妙な視点の変化が起こった。アインシュタインの重力理論では，空間と時間が圧倒的に重要な役割を果たす。物体の運動は空間の性質で決まる。そして物質が空間の構造を決め，空間の性質が物体の運動を決定する。なんとも壮大な図式だが，アインシュタインの絶対的な権威をもってしても，この図式を物理学界に浸透させることはできなかった。それでも，アインシュタインは，電磁気学をこの体系の中に取り入れることに後半生を費やした。電気や磁気を時間空間の性質に帰着させようとするこの試みは，アインシュタインによる統一理論の追究とよばれている。試みは成功しなかったけれど，アインシュタインは簡単に諦めて考え方を変えるような人ではなかった。しかし，彼の考え方は次第に通用しなくなった。重力と電磁気力以外にもさまざまな力が見つかってきたからである。時間空間の性質によって，それらの力を説明しようとする試みは，現実的なものではなかった。統一理論の時代は過ぎ去ったのである。

物理学者の法則に対する考え方を，たとえ話で説明しよう。空間–時間と量子力学の法則は，劇の舞台装置のようなものだ。素粒子は役者で，役者が演じるのが物理現象である。舞台上のドアが本物かどうかは，役者が通り抜けるまでわからない。もしかしたら，壁に描かれた偽のドアかもしれない。



マックス・プランク(Max Planck，1858–1947)　量子物理学の創始者。1900 年に，エネルギーが量子化されていることを見抜き，いわゆるプランクの定数を導入した。この定数は，すべての量子現象を測る尺度となっている。プランクは「エネルギー量子を発見し物理学の進歩に大きく貢献した業績によって」，1918年にノーベル賞を受賞した。さらに，アインシュタインの業績，特に相対性理論をいち早く評価したひとりでもある。アインシュタインによると，プランクは彼のことを貴重な切手か何かのように扱ったという。ともかく，プランクはアインシュタインをベルリンに呼び寄せることに成功した。

プランクの仕事の重要さとその影響は，筆舌に尽くしがたい。ドイツのマックス・プランク協会は，彼にちなんで名づけられている。プランクは，まさに量子力学の父である。原子のように粒々の構造はプランク以前にも考えられていたが，彼はそれまで連続だと考えられていたエネルギーの放出・吸収が量子的になることを発見した。その上，彼の発見は単なる空想ではなく，実際の物理的観測に基づいていた。

プランクは物理学以外の才能にも恵まれていた。才能豊かなピアニストだった上に作曲も行い，歌曲も歌ったし，舞台に立ったこともある。彼は「森の中の恋」という，胸踊る美しいオペラを作った。

プランクは長生きだった。だが，彼の人生には悲劇的な側面もある。彼の最初の妻は，結婚から 22 年後の 1909 年に亡くなった。彼らには，男の子と女の子がそれぞれ 2 人ずついたが，長男は第 1 次世界大戦で戦死している。2 人の娘はともに出産が元で早世した(1918 年と 1919 年)。彼の家は，第 2 次世界大戦で完全に破壊された。さらに末の男の子は，1944 年 7 月 20 日にヒトラー襲撃に連座したかどにより，親衛隊によって惨殺されたのである。

つまりこの本では，素粒子を中心に話を進めていく。素粒子が役者となって演じる劇に，我々はうっとりと見とれるのだ。だが，たいへん不思議なことがある。この劇では，特定の役を演じる者が必ず3人組で登場するのだ。読者は，このような劇をどう思うだろう？　3人の役者達は，まったく同じ容貌で同じ衣装を着け，同じ台詞を語る。だが，大きさだけは違う。それも桁違いに異なっている。1人の役者だけが，ほかの役者の35000倍も大きいのだ。現時点で，素粒子を分類しようとすると，どうしてもこのような事態に陥ってしまう。なぜ3人も役者が現れるのか，誰も知らない。現代の大きな謎である。実際にこのような劇を見た人は，3人組がでてくる特別の理由があるはずだと思うだろう。そして，第一幕の終わりには，この謎が解き明かされるに違いないと期待するだろう。だが，残念ながら，期待には添えない。確かに，素粒子とその相互作用について，たくさんのことがわかってきた。しかし，我々にわかったことは，新しい知識は新しい謎をよぶこと，つまり我々は完璧な理解に至っていないということだった。もっとも重要なのは，重力と量子力学の関わりについてすら，我々は完全に理解していないということである。

この本の構成を紹介しよう。第1章は入門編である。原子，原子核，陽子，中性子それにクォークなどについて説明しよう。光子や反粒子についてもここでふれる。さらに，質量とエネルギーの入門的解説と，素粒子物理学で中心となるイベントの概念について説明しよう。最後に，単位や粒子の名前など，必要なことをまとめる。第2章は，登場人物である素粒子とその相互作用の紹介から始める。現在，力は粒子の交換によって起きると考えられているので，「力」の代わりに「相互作用」という言葉を用いる。第2章で扱う素粒子と力をまとめて標準モデルとよぶ。第3章では，量子力学の基本的概念を論じよう。第4章では，力学の要点と相対性理論を解説する。言い換えると，役者が劇を演じる舞台について論じよう。実験的な方法の基礎については，第5章と第6章で簡単にふれる。この方面の研究がどのように行われ，進歩していくかわかるだろう。第7章では，1963年に行われたセルンのニュートリノ実験の顛末を述べる。新たな粒子を粒子の表に付け加えるために，どれだけ大がかりな実験が行われているかがわかるだろう。第8章では，束縛粒子も含め，これまでにわかっている粒子の分類について振り返る。この分類を粒子の動物園とよび，ここからどのようにしてクォークというアイデアが生まれたか述べていこう。こ

のアイデアのおかげで，粒子の動物園が，いくつかの素粒子の集まりとして整理されたのである。第 9 章では，少し難しいかもしれないが，素粒子の理論をわかってもらいたい。第 10 章では，ヒッグス粒子とその実験的探索に関する議論をつづける。最後に第 11 章では，強い相互作用についてふれる。強い相互作用はクォークを結びつける役割を果たす。そして生まれた数多くの粒子によって粒子の動物園が満員になる。

読者には，次の真理をぜひ知っておいてほしい。説明するというのはなかなか骨が折れる作業である。宇宙がなぜ存在するのか説明できないのと同じように，ある粒子がなぜ存在するのか説明するのは難しい。また，我々が日常経験するニュートンの法則と，量子力学の法則とはまるで異なっている。だから，量子力学は難しい。この障害を乗り越えるのに，普通，物理学者は数学を用いる。量子力学を使って計算することができるということを，理解できたと考えるのだ。どんな場合に何が起きるか計算することができれば，実際上は役には立つ。しかし，量子力学に使う数学を，本書の読者が知っているとは限らない。式に頼らずに，奇妙な事実を受け入れざるをえないことも多いということだ。もちろん，筆者はできるだけ平易に説明し，読者が受け入れざるをえないことは明確に述べるように努めるつもりだが。

謝　辞

本書を書くにあたり，批判や建設的意見を寄せてくれた多くの方のお世話になった。特に，娘のヘレーネ(Hélène)は一度ならず全体に目を通してくれた。また，すべての章を読んで理解できないところを指摘してくれた神経科医のカレル・メッヘルセ(Karel Mechelse)には，特別な感謝を捧げたい。物理学者でない読者にとって，この本が読むに値するならば，ひとえに彼のおかげである。さらに，学術的内容と表現方法の両面において忍耐強く助言してくれた，ほぼ非のうちどころのない記憶力の持ち主，バル・テレグディ(Val Telegdi)の助力を忘れるわけにはいかない。彼のコメントから得たものは実に大きい。それだけでなく，彼の妻のリアが彼らの家で 2 つ星並の夕食でもてなしてくれたことにも謝意を表したい。おかげで，バルの批判にさらされる緊張がずいぶんほぐれた。

NIKHEF（オランダ国立素粒子物理学研究所）の人々にも感謝している。なかでも，ケース・ハイザー（Kees Huyser）には，計算機，画像さらに活字の使い方に至るまでお世話になった。

さらに学びたい人に

物理に関する本はたくさん出版されている。評判の良いものも悪いものも玉石混交だが，それぞれに特色がある。とりわけ次の2冊は格別である。

アブラハム・パイス著／西島和彦監訳 『神は老獪にして…―アインシュタインの人と学問』産業図書 1987年 ISBN 978-4-7828-0035-5（4-7828-0035-5）

Abraham Pais, *Inward Bound : Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press 1986, ISBN 0-19-851997-4

この2冊の大作は，歴史的資料も豊富で，物理に関する議論も信頼できる。本書の執筆に際して参考にすることも多かったし，時には引用もさせてもらった。一言だけ断っておくと，パイスは理論物理学者なので，実験の重要性や実験家の創意工夫に関する記述については，物足りないところもある。進歩はいつも実験結果に依存しており，それなくしては，どれほど賢い人でも道に迷ってしまう。例えば相対性理論は，光速度に関するマイケルソン-モーリーの実験によっている。黒体放射の精密測定がプランクのいるベルリンで行われなかったら，彼の発見もなかっただろう。一方，実験家側も有意義な実験を行うためには,理論をそれなりに理解しておかなければいけない。自然に対する我々の理解が今日の状態に至ったのは，実験と理論がしっかりと協力しあった結果なのである。

実験家の著作として，次の本をあげておこう。

レオン・レーダーマン著／高橋健次訳 『神が作った究極の素粒子』草思社 1997年 上 ISBN 978-4-7942-0778-4 下 ISBN 978-4-7942-0779-1

人物紹介

この本には，写真入りの短い人物紹介が多く収められている。はっきりと断っておきたいのだが，私は載せる物理学者を功績で選んだわけではない。偉大な物理学者でも載せていない場合も多い。私は彼らを紹介することで素粒子物理学に人間の顔をもたせたかったのである。それぞれの人物を評価したかったのではない。写真が手に入りやすい人を載せたという面もある。

数　式

時として，少し数学的に説明をしたところが何か所かある。ほとんどの場合は理解しなくてもかまわない。ただし，理解を助けることになると期待はしている。そのように本質的でない部分は，このように網掛けにして文字も小さくしてある。

1 準　備

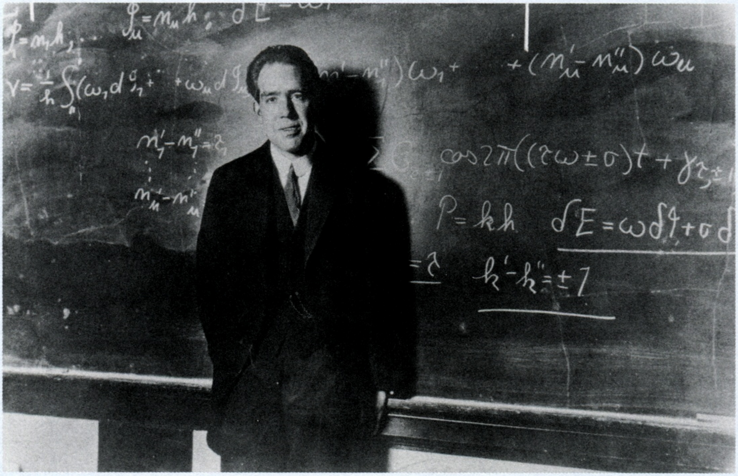
1.1 原子，原子核，素粒子

どんな物質も分子からできている。分子とは，原子が結合した状態のことである。水を例にあげよう。水は，水分子によって構成されている。水分子とは，酸素原子1つと水素原子2つが結合した状態のことをいう。H_2O という化学式は，この状態を示している。

自然界には92種類の原子が存在する（原子番号43のテクネチウムは自然界には存在しない，人工的につくりだされた原子である）。原子には原子核があり，電子が周りを回っている。原子の大きさ，つまり一番外側の電子の軌道の大きさは，だいたい1億分の1 cmだ。原子核の大きさは，この10万倍も小さい。つまり原子はほとんど空っぽなのである。原子核をテニスボール（直径約6.35 cm）に例えると，一番目の電子は約6.35 km離れて回っていることになる。1911年，ラザフォードは原子核に重い粒子（α 粒子[a]　ある種の放射性物質から飛び出してくる粒子）を打ち込んで，原子のほとんどの部分が空っぽであることを発見した。ビリヤードのボールにとって小さな埃が問題にならないのと同様，比較的重い粒子は，非常に軽い電子には影響されない。だから，重い粒子は原子核によってのみ散乱される。細かい点はともかく，ラザフォードは原子核の大きさを推定することに成功した。

---

[a] α 粒子はヘリウムの原子核で，陽子2個と中性子2個から構成されている。もちろん当時は知られていなかった。

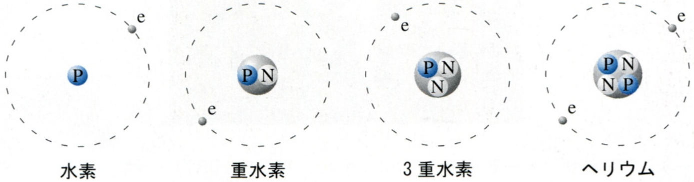


ニールス・ボーア(Niels Bohr，1885-1962)　1913 年，原子核とその周りを回る電子からなる原子モデルを発表したボーアは，以後の量子力学の理論的発展を指揮する重要人物となった。ハイゼンベルクやシュレディンガー，ディラックやボルンが実際に計算するための数学的定式化を発見した頃，ボーアは正体のわからない新理論の物理的な解釈に取り組んでいた。そして，生涯にわたって量子力学を認めなかったアインシュタインが初めて反対意見を述べた 1927 年のソルベイ会議を皮切りに，有名なボーア-アインシュタイン論争が勃発する。最終的には(1930 年のソルベイ会議において)，アインシュタイン自身が提唱した重力理論から導かれる結論によってボーアが勝利を収めたのだが，アインシュタインは，終生，ボーアの見解を受け入れようとはしなかった。

ボーアが彼の原子モデルに関する一連の研究を始めたのは，ラザフォードの影響が色濃く残るマンチェスターだったことにふれておきたい。ボーアの 1913 年の 3 部作は，パイスの言葉を借りるならば，量子力学の華々しい幕開けだった。彼の 3 部作は，水素の特定のスペクトル線(バルマー系列)などの多くの現象について説明を与えた。

1922 年，ボーアはノーベル賞を受賞した。そして第 2 次世界大戦中にデンマークから脱出し，アメリカでの原子爆弾計画に関わることになる。戦争が終わるとコペンハーゲンに戻り，ヨーロッパの主要人物としてセルン(CERN，素粒子物理学研究のヨーロッパにおける中心)の設立に重要な役割を果たした。実は，最初の頃，理論部はコペンハーゲンのボーアの研究所に間借りしており，ボーアはその初代の責任者を務めている。

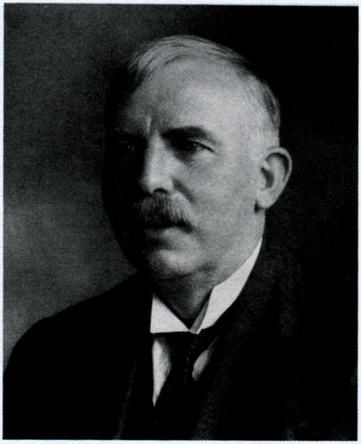
原子核をつくっているのは陽子と中性子で，核子ともよばれる。陽子の電荷は＋1（電子の電荷を−1とする単位を用いる），中性子は電気的に中性である。原子の中にある電子の数は原子核中の陽子の数と等しいので，原子は電気的に中性である。原子から，1つまたはそれ以上の電子を追い出すこともできる。そうすると残った部分はもはや電気的に中性ではなく，陽子が多い分だけ正の電荷をもつことになる。このような原子の状態をイオンとよぶ。また，電子を追い出す過程をイオン化という。例えば空気中での電気放電ではこのような現象が起きて，空気がイオン化される。



もっとも軽い原子は水素原子である。たった1つの陽子からなる原子核と，電子1つからできている。重水素とよばれる重い水素の原子核には，中性子が1つ多い。水分子を構成する水素原子が2つとも重水素なら，「重水」とよばれる。自然状態の水には，重水素を1つないし2つ含む水分子が約0.015％混ざっている。余分な中性子を2つもつ水素はトリチウム（3重水素）とよばれる。2番目に軽い元素であるヘリウムは，電子2つと核子4つ，つまり陽子2つと中性子2つで構成されている。

原子核物理学は原子核を研究する学問である。原子核の実験家は，さまざまな原子核に電子などの入射粒子をぶつけることによって，原子核の正確な構造を調べている。彼らが関心をもっているのは陽子や中性子ではなく，原子核の構造だ。しかし最近は，原子核物理学と素粒子物理学との境界が曖昧になってきている。

知ってのとおり，陽子は3つのクォークからなっている。クォークには多くの種類があり，長い年月の間にさまざまな名前をつけられてきた。uで表すアップクォークとdで表すダウンクォークには，それぞれ赤，緑，青の3種類がある（もちろん，実際の色ではない。単に異なるクォークを区別するための便宜上の方法である）。陽子は，アップクォーク2つとダウンクォーク1つから

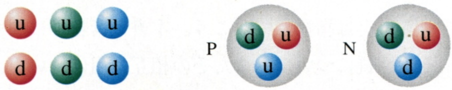


アーネスト・ラザフォード(Ernest Rutherford, 1871-1937)　ラザフォードは放射能を調べて分類し，原子核の存在をはっきりと示す実験を初めて行った。1908 年には，「元素の崩壊および放射性物質の化学的性質に関する研究」によってノーベル化学賞を受賞した。ノーベル賞受賞後に行った研究が最大の業績だという点で，ラザフォードは珍しい人物だ。最大の業績というのは，原子核からのα粒子の散乱である。もともと研究を始めたのはガイガー(Geiger)とラザフォードだが，ラザフォードの指導の下で実際に実験を行ったのは，ガイガーとマースデン(Marsden)である。ガイガーは，ガイガー-ミュラー・カウンター(ガス放電を利用した放射線計数管)で有名な人物だ。後にラザフォードがこの実験結果を説明する理論を発表したので，この現象はラザフォード散乱とよばれている。

ラザフォードは，放射能の奇妙な点に気がついた最初の人物である。放射能の発生源近くでガイガー・カウンターの刻む音を聞けば，時計の音と違って，それらが不規則なことに気がつくだろう。これは粒子が決定論に従わないことに関する最初のヒントであった。ラザフォードはこの点に気づいたのである。

ラザフォードはニュージーランド出身である。1914 年にナイトの称号を贈られ，後にネルソン郡のラザフォード卿となった。彼の偉大さは，その研究だけによるものではない。キャベンディシュ研究所はマクスウェルによって創設されたが，そこのラザフォードの研究室はすばらしい物理学者を輩出した。彼の研究室で中性子を発見したチャドウィック(1935 年にノーベル賞受賞)，1932 年に 700 000 ボルトの発電機を作り最初の陽子加速器を製作したコッククロフトとワルトン(Cockcroft, Walton, ともに 1951 年にノーベル賞受賞)も，ラザフォードの研究室出身である。たいした研究室じゃないか！

構成されているが，これらのクォークはすべて色が違う。中性子はアップクォーク1つとダウンクォーク2つからできており，陽子と同様，クォークの色はすべて異なる。アップクォークとダウンクォーク，それから陽子(P)と中性子(N)がクォークから構成されている様子を象徴的に表すと，図のようになる。



クォークの色を下付き添え字で表すこともあるので混乱しないでほしい。例えば u_r という記号は赤い(red)アップクォークを示している。クォークを小さな球として図示することがある(電子などについても同じだが)が，本当にそんな形をしているわけではないことも，強調しておきたい。我々が知るかぎりではクォークは点のような振る舞いを見せる。クォークや電子の構造はこれまで観測されたことはない。ただ，球で図示すると便利なことが多いことは確かである。例えば記号を挿入したり，反粒子の場合は枠を書いたり，色をつけたりすることができる。

陽子と中性子は自由粒子[†]として観測される。例えば，水素原子から電子を剥ぎ取ると陽子が1つ残る。中性子は単体だとすぐに(平均10分ほどで)崩壊する。しかし崩壊までの間に，詳細に研究することは可能である。だがクォークは単体では存在できず，陽子や中性子の中に閉じ込められた束縛状態としてのみ存在する。陽子や中性子内でクォークが束縛されている様子は非常に複雑で，完全には解明されていない。陽子や中性子の中にどんなクォークがあるかに関する情報は，鵜呑みにしないほうがよいだろう。クォーク以外にも，クォークを結びつけているグルーオンという粒子があるからだ。陽子や中性子中には，原子中にある光子よりもはるかにたくさんのグルーオンがあると考えられている(原子中では電磁気力，つまり光子が原子核と電子を結びつけている)。実際，陽子や中性子の質量のほとんどは，グルーオンのエネルギーとして存在している。一方，原子中の電場のもつエネルギーは非常に小さい。

---

† (訳者注)力がはたらかないため等速直線運動をする粒子を自由粒子という。

我々の知るかぎり，電子やクォークは素粒子である。つまり，これまで行われたどんな実験でも，これらの粒子の構造は見つかっていない。陽子や中性子，原子核や原子のように大きさを測定できる粒子とは違って，電子やクォークは点粒子として見えている。もちろん現在素粒子とよばれている粒子が，実は複合粒子だということが判明する日がくるかもしれない。ただし，これまでに随分詳細に調べてあるという事実は指摘しておこう。本書は素粒子に関する本である。素粒子について，その性質について，またその相互作用について，すべてを知ることを目的としている。つまり本書では原子核物理，原子物理，化学，そして物理的な世界すべてが素粒子の法則から導かれると考える。このような意味で，現時点における見解では，素粒子とその相互作用が自然界の基本である。素粒子物理学者は，陽子，中性子や原子などの大きな物の構造ではなく，主としてこれらの素粒子を研究している。

ヨーロッパにおける主要な素粒子研究所はセルン(CERN)と名づけられ，現在，公的にはヨーロッパ原子核研究機構とよばれている。だが，このよび方は正しくはない。セルンでは，原則的に，原子核物理の研究は行われていないからだ。実はセルン設立当初(1953年)，原子核物理という単語は予算獲得に結びつく魔法の言葉であった。おもしろいことにヨーロッパ原子共同体(Euratom)という組織では，原子ではなく原子核についての研究が行われている。ほかに重要な研究所としては，ドイツのハンブルクにあるデジー(DESY，ドイツ電子シンクロトロン研究所)もある。アメリカ合衆国には，ニューヨーク近郊のロングアイランドにあるビーエヌエル(BNL，ブルックヘブン国立研究所)，シカゴ近郊のフェルミラボ(Fermilab，フェルミ国立研究所)，サンフランシスコ近郊のスラック(SLAC，スタンフォード線形加速器センター)などがある。

1.2 光　　子

1905年，アインシュタインは，電磁放射は量子化されており，光子(光量子)というエネルギーのかたまりとしてのみ現れる，という思い切った提案をした。当初は大間違いと思われた彼の考えが認められるまでには15年かかった。1921年，アインシュタインはノーベル物理学賞を受賞したが，スウェーデン王立アカデミーは受賞理由として理論物理に対する貢献，特にこの発見をあげ

世界を変えた論文：プランクの量子

ドイツ物理学会報 2 (1900 年) 237 頁

Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum;
von M. Planck.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)
(Vgl. oben S. 235.)

M. H.! Als ich vor mehreren Wochen die Ehre hatte, Ihre Aufmerksamkeit auf eine neue Formel zu lenken, welche

~~~

teilung auf unendlich viele Arten möglich. Wir betrachten aber — und dies ist der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung — E als zusammengesetzt aus einer ganz bestimmten Anzahl endlicher gleicher Teile und bedienen uns dazu der Naturconstanten $h = 6{,}55 \,.\, 10^{-27}$ [erg × sec]. Diese Constante mit der gemeinsamen Schwingungszahl ν der Resonatoren multiplicirt ergiebt das Energieelement ε in erg, und durch

プランクは本論文において，彼の輝かしい成果である黒体放射の公式について説明しようと試みている。そしてエネルギー量子という概念を用いることで，成功した。さらに$\varepsilon = h\nu$という式を（言葉で）提案した。現在では，h の値は 6.626×10^{-27} とされている。なんとプランクの提案した値と近いことか！

正規スペクトルのエネルギー分布則に関する理論について

M. プランク

みなさん！　数週間前，私は新しい公式を皆様に注目していただく光栄に浴しましたが……

~~~

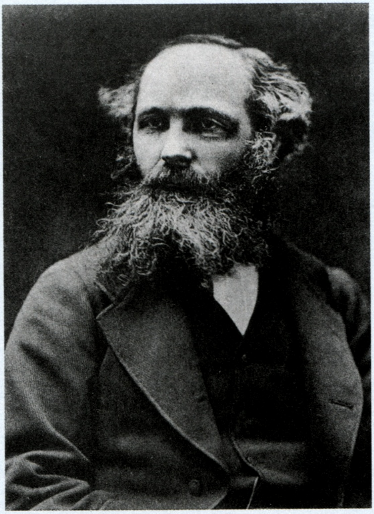
……計算全体の中でもっとも重要な点は，E がある一定のエネルギー単位の整数倍になっていることです。そこで，自然界の定数 $h = 6.55\times10^{-27}$ erg·s を導入することにします。この定数 h に共振器の振動数 ν をかけると，エルグで表わした一定のエネルギー単位になるのです。そして……

ている。光電効果に関する彼の論文の該当部分には，ほとんど数学が含まれていない。それにもかかわらず，物理学として実にすばらしい。この点は特筆すべきだろう。偉大な物理学は，必ずしも複雑な数学を必要とするわけではない！

一筋の光線があるとき，我々は，その光線を光子の流れと考える。それらの光子のエネルギーは，電磁波の種類に依存している。電波の光子がもつエネルギーは，可視光の光子のエネルギーよりも小さい(可視光の中では，赤色光の光子のもつエネルギーは青色光の光子よりも小さい)。X線の光子がもつエネルギーは非常に大きいが，ガンマ線の光子はそれを上回る。素粒子物理学の実験では，光子のエネルギーは非常に大きく，一個一個の光子を扱う場合が多い。素粒子実験で用いる光子がもつエネルギーは，携帯電話から出る光子のエネルギーの一千億倍も大きい。光子のエネルギーは，少し前に(1900年)プランクが提案した関係式を使って算出することができる。この式には，プランク定数とよばれる新しい定数が入っている。プランクは量子化という概念を導入した最初の人物だが，光が量子化されているということまでは思い至らなかった。光がかたまりで放出されるとまでは考えたけれど，光はそのようなかたまりでしか存在しない，とは考えなかったのだ。彼の仮説は，光を放出する過程がそのような性質をもっているというものであり，光そのものの性質がそうなっているというものではなかった。小さな違いにみえるかもしれないが，このような一歩を踏み出すことは，実はもっとも難しいことなのである。

1913年にプランクたちがアインシュタインをプロシア科学アカデミーに推薦したときの推薦文を引用しよう。「要約すると，現代物理学を豊かにしている重要な問題では，そのすべてにわたって，アインシュタインがすばらしい貢献をしています。光量子仮説にみられるように，アインシュタインでも時には的をはずすこともありますが，その点を非難すべきではないでしょう。なぜなら本当に新しい考えを提唱するには，どれほど精密な科学においても，時として冒険せざるをえないのですから」。

光子の概念から重要な帰結を導くことができる。1973年，マクスウェルはすべての電気的，磁気的な現象をマクスウェル方程式とよばれる式によって表した。そして，光は電磁場の一形態である，というすばらしい考えを提案した。この考えは驚くほどうまくいった。したがって，電磁場は光子からできていることになる。だから現在のところ，電気的，磁気的な力は光子の作用によって



ジェームズ・クラーク・マクスウェル(James Clerk Maxwell, 1831-1879)　マクスウェルは電磁気学の法則を初めて書き下し，光を電磁波の一種として説明した。彼が考案した方程式は今日でも正しい。また，彼の理論は多大な影響を及ぼしている。なんと言っても，相対性理論はマクスウェルの理論から発展したのである。実用面でも，マクスウェルが予言した電磁波が，ヘルツ(Hertz)に発見され，マルコーニ(Marconi)などによって応用された。マクスウェルは，ニュートン(Newton)やアインシュタインと肩を並べる物理分野の偉人に違いない。

彼がすばらしい才能を発揮したのは，電磁気学だけではない。彼は箱の中の気体のように，非常にたくさんの分子からなる系を記述する方程式を考え出した。この式はマクスウェルの速度分布とよばれている。

さらに彼は，分子を選択的に通す悪魔(マクスウェルのデモン)，という概念を創り出した。容器の真ん中に壁を設け，壁には小さな穴を開けておく。悪魔は穴の近くに座って，速く動く分子だけ，壁のこちら側からあちら向きにのみ通し続ける。気体の温度は，分子の平均速度と直接関係しているので，壁の向こう側の気体は，こちら側に残っている気体よりも温かくなっていくはずである。残念ながら，そんな悪魔は存在しない！

1874年に，マクスウェルはケンブリッジ大学キャベンディシュ研究所の初代所長となる。当時，理論家と実験家の区別は今ほどはっきりしていなかった。彼の後継者には，J. J. トムソン(1879-1919)やラザフォードがいる。

起きると考えざるをえない。光が光子の流れだと想像することは比較的簡単だが，電場が光子によってどのように生じるか理解するのは難しい。光の中の光子と性質は異なるが，電場は光子によってつくられるのである。しかし，その点を議論するのはまだ早い。第4章でマスシェル(mass-shell)という概念について説明した後に，もう一度議論することにしよう(光の光子はマスシェルの上にあるが，電場や磁場の光子はマスシェル上にはない)。

最後に，光が波のように振る舞うことを思い出してほしい。このことをもっともはっきりと示したのは干渉実験である。どういうわけか，粒子は(この場合は光子)波のように振る舞うのだ。量子力学，古いよび方をすれば波動力学の起源は，この事実に由来している。アインシュタインはこの点を熟知していたが，量子力学を発見することはなかった。彼が量子論を思いつかなかったという事実は意外のひとことに尽きる。光の波動論を熟知し，さらに光子という概念を導入したにもかかわらず，アインシュタインはそれら2つの概念を融合させた理論をつくらなかった。パイスによれば，1905年から1910年の間，アインシュタインはこの問題に非常に熱心に取り組んでいる。今から見れば一本道でも，アインシュタインは気づかなかったのである。

1.3 反粒子

反粒子について簡単に説明しておこう。詳しい説明は後にまわすが，ここで理解しておいてほしいのは，普通の粒子と性質が異なる部分もあるとはいえ，反粒子もやはり「粒子」だということである。粒子とその反粒子はまったく同じ質量をもち，地球の重力場の中では同じように落下する。電子の反粒子は陽電子とよばれる。電子と同じ質量をもち，電荷は電子と逆符号だ。それだけである。だから，反物質だからといって，決して神秘的なものと考えないでほしい。名前は名前にすぎない。粒子と反粒子の名前を入れ替えてもよい。何を粒子とよび，何を反粒子とよぶかは，単なる約束事にすぎない。陽電子を粒子とよび，電子を反粒子と考えてもかまわない。確かに粒子と反粒子は激しく反応する。しかし電子-陽電子の反応とたいして違わない反応も数多い。例えば，エネルギーが非常に大きくなると，陽子どうしの衝突は陽子と反陽子の衝突と非常によく似てくる。

世界を変えた論文　アインシュタインの光量子

物理学年報 17 (1905 年) 132 頁

6. ***Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;***
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die

〜〜〜

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die „schwarze Strahlung", Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

Bern, den 17. März 1905.

光の発生と転換に関する一つの発見法的見地について

A. アインシュタイン

物理学者の理論的な考えと……

〜〜〜

黒体放射，光ルミネッセンス，紫外光による陰極線の生成など，光の発生と転換に関する観測事実は，光のエネルギーが空間において不連続に分布すると仮定すれば，よりよく理解できるように思われる。ここに提案する仮定によれば，点光源から出る光は広い領域にわたって連続的に広がっているのではなく，有限個の局在化しているエネルギー量子からできている。そのエネルギー量子は分割されずに，ひとつのかたまりとして吸収または放出される。

反粒子という概念の重要性は，自然の基本法則に由来している。つまり，それぞれの粒子には，まったく同じ質量をもつ対応する反粒子が存在するのである。その他の性質は粒子の性質から導くことができる。例えば，電荷は大きさが等しく逆符号になる。ただしこの法則は，ある粒子と対応する反粒子が，その粒子自身である可能性は排除していない。このような特殊な場合，その粒子の電荷は必然的に0である。光子はそのような粒子だ。つまり光子の反粒子は光子自身である。

反粒子だということを示す場合には，粒子名，あるいは粒子を表す記号の上に線を引く。つまり，$\overline{\text{電子}}$，と書くと陽電子のことを示している。同じように，$\overline{\text{陽電子}}$，と書くと電子を表す。本書ではこの表記法を使っていこう。いくつかの素粒子からなる束縛状態には，それぞれの反粒子からなる反束縛状態がある。例えば，陽子には3つのクォークが含まれている。uが2つ，dが1つだ。そして，反陽子には2つの反アップクォーク$\overline{u}$と1つの反ダウンクォーク$\overline{d}$が含まれている。セルンでは，反陽子の周りを陽電子が回る反水素がつくられている。

1.4 質量とエネルギー

エネルギーは非常に基本的な概念として，素粒子物理学の中心的な役割を果たしている。ここで，必ず理解しておいてほしい物理法則が，エネルギーと物体の速度の関係である。光速よりも遅い速度で動いている物体の場合，相対論的な効果は無視できる。ここで問題にしているのは，高校で習ったかもしれないが，運動エネルギーとよばれる種類のエネルギーである[b]。エネルギーと速度の間の関係は，2次式で表される。車の速度を時速100 kmまで加速するために必要なエネルギーは，(摩擦を無視するなら)時速50 kmに加速する場合の4倍になる(ガソリンも4倍必要だ)。反対の関係も成り立つ。つまり時速100 kmで走る車を止めるためには，時速50 kmの車の4倍の停止距離が必要なのだ。

> ガソリンの消費量は，車の速度の2乗に比例する。摩擦に打ち勝つために使うエネルギーが，速度の2次関数になるからだ。2次式の関係にあるということは，速度が1% 程度増加するとエネルギーの増加率が速度の増加率の約2倍

---

b 運動エネルギーの数式は，$E = \dfrac{1}{2}mv^2$ である。



ポール・ディラック(Paul Dirac, 1902–1984)　1928 年，ディラックは量子力学と相対性理論を組み合わせることに成功した。さらに，1929 年には反粒子という概念を導入する(ただし反粒子という名前は，1934 年にド・ブロイがつけた)。だが残念なことにディラックの業績のすばらしさは，専門家にしか理解されなかった。著名な物理学者だったライデン大学のエーレンフェストによれば，ディラックの業績はとても人間業とは思われないという。今日においてなお，その輝きは失われていない。

多くの逸話によると，ディラックは口数が多いほうではなく非常に正確に話す人物だったらしい。こんな話がある。あるセミナーで，「ディラック教授，私はその式が理解できないのですが」という質問が出た。沈黙しているディラックに，座長は質問に答えるかどうか尋ねた。ディラックの返事は「先ほどの発言は質問ではなく，主張である」だったそうだ。

一般に，ディラックは場の理論の創始者だと考えられている。量子力学が論理的に発展していった到達点が場の理論であり，粒子の生成や消滅の過程にも適用できる。例えば，水素原子中の電子の状態を計算するには量子力学で十分だ。しかし，電子がある軌道から別の軌道に移動するときに放出する光の強さを計算するためには，場の理論の枠組みが必要である。ディラックが提案した後，場の理論はさまざまに変化してきた。年月とともに発展を続け，現在では素粒子間の相互作用についてのゲージ理論として集大成されている。

になるということである。例えば時速 105 km で走っている乗り物は，$105^2=105\times105=11025$ に比例してエネルギーを消費するので，時速 100 km の場合の $100\times100=10000$ よりも，約 10％ 余分なガソリンが必要になる。まとめよう。乗り物の速度が 5％ 上がれば，必要な燃料は 1 km（あるいは mile）当たり約 10％ 増加する。

さらに，必要なエネルギーの総量は，乗り物の質量に比例する。2000 kg の車を加速するために必要なエネルギーは，1000 kg の車を同じスピードまで加速する際の 2 倍である。2000 kg の車は 1000 kg の車が 2 台繋がったものだと考えればわかりやすいだろう。

上の例は地球上を走る車についてのものだが，この関係は，より広い範囲でも一般的に成り立つと考えてよいだろう。月面や火星上で車を時速 50 km まで加速するには，地球上で必要な分と同じだけのエネルギーが必要である。エネルギーの計算に必要な車の質量は重力とはまったく関係がない。とはいえ通常の場合，物体の重さを量れば質量は測定できる。なぜなら，物体の重さは，同じ惑星上で測定されている場合には，いつも質量に比例するからだ。月面で量った物体の重さは，地球上で量るよりも軽くなるけれど質量は変わらない。エネルギーの計算で使うのは質量だ。つまり，物体の質量を量るには，重さを量った上で，重さから質量への変換係数を掛ける必要がある。この比例係数は，重力環境が変われば変化する。

本書で質量とよんでいるものは，特に素粒子の場合は，重さとはまったく関係がない。質量は，物体の速度からエネルギーを計算するときに必要な係数にすぎない。質量を測定する機械がどんなものかを知りたければ，次のように想像していただきたい。質量を量りたい物体を加速し，ばねにつながれた板にぶつけると，板は押されて動く。板が押されて動いた距離を測れば，物体の質量がわかる。この質量計は地球上だけでなく，月や火星，さらに宇宙空間に浮かぶ宇宙船の中でさえも使うことができる。

ここで大切なことは，車の質量がわかれば，その車をある速度まで加速するために必要なエネルギーの量が計算できるということである。相対論的な速度の場合には，エネルギーを計算する式は少しだけややこしくなる。だが，基本的な部分は変わらない。物体のもつエネルギーは，その物体の質量と速度を用

いて計算できるからだ。機械的な物体でも，自由運動をしている粒子でも同じである。逆に，粒子のエネルギーと速度がわかっていれば，その質量を計算することができる。例えば，ある車がある速度に達するために必要なガソリン消費量がわかっていれば，車に乗っている人数を計算することもできる(車自体の質量と，乗客の平均体重がわかっていればの話だが)。寿命が非常に短い粒子の質量を測定する場合にも，本質的には同じ方法を用いる。エネルギーと速度を測定すれば，質量を決定することができるというわけだ。

物体の速度が光速に近くなると，事情が若干変わってくる。アインシュタインの相対性理論を考慮する必要がでてくるのである。この理論における光速は，古い理論における無限の速度と同じ役割を果たしている。つまり，光速は決して超えられない。速度が光速に近づけば，その物体のエネルギーは非常に大きくなる。実際，光速に近づく極限では無限大になる。このような場合には，速度を用いて運動の状態を表そうとしないほうがいい。素粒子物理学では，大抵の場合光速に近い速度を扱うのだが，いくつか例を見ればすぐに，速度を使わないほうがよい理由がわかるだろう。

1950 年代の典型的なサイクロトンは，陽子を 1 GeV (とりあえず単位にはこだわらなくてよい)のエネルギーまで加速していた。光速を 300 000 km/s とすると，加速器から出てくる陽子の速度は 262 500 km/s だった。1960 年に，セルン初の大型加速器，PS が陽子を 30 GeV，速度に直すと 299 850 km/s まで加速した。セルンでもっとも新しい加速器，LEP (大型電子陽電子衝突型加速器)は陽電子をエネルギーが 100 GeV になるまで，つまり 299 999.999 996 25 km/s の速度まで加速した。

光速に近い場合でも便利な量として，運動量を取り上げよう。速度が遅いときには，運動量と速度は本質的に同じである(つまり，運動量は単に質量を速度に掛けたものと考えてよい，つまり $p = mv$)。速度が 2 倍になれば運動量も 2 倍になる。この関係は，速度が光速に近くなると変わってしまう。運動量が，エネルギーを光速で割った値に近づくのである。

我々にとって重要なのは，粒子のもつエネルギー(あるいは運動量)であって，速度ではない。エネルギーと運動量の正しい関係を知るためには，質量とエネルギーの関係(つまり質量に対応したエネルギーの量)を考慮しなければならない。停止している物体(運動量は 0)のエネルギーは 0 ではなく，アインシュタ

質量 m の物体におけるエネルギー E と運動量 p との関係は，すべての運動量の値に対して，次のように表すことができる。

$$E = c\sqrt{p^2+m^2c^2} \longrightarrow E = mc^2 \quad (p=0\text{ のとき})$$

運動量とエネルギーと速度との間の関係式は，次のように表される。

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}},\ E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}},\ v = \frac{pc^2}{E}$$

光速を 1 とする単位を用いると，速度は運動量をエネルギーで割った商と等しくなる。

$$v = \frac{p}{E}$$

インによれば光速を c としたとき，$E = mc^2$ に等しい。

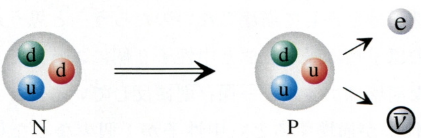
1.5　イベント(事象)

素粒子実験物理学では，イベント(事象)を扱う。テレビ管の中で，電子がテレビのスクリーンにぶつかるのもひとつの事象である。事象とは起こっていること，つまり粒子間の反応だ。粒子を正確には制御することはできないので，それぞれの事象はひとつひとつ違っている。例えば，1 個の電子がスクリーンのどの 1 点を通過するか正確に予測することは不可能である(ただし通常のテレビでは，1 個の電子はスクリーン上の 1 つの小さな四角，つまり 1 つのピクセルを通過するだろう。テレビの場合にはその程度の精度で十分だ)。同様に，初期状態がまったく同一だったとしても，大抵の場合，さまざまな種類の反応が起こる。不安定な粒子は，ある時はこちら，またある時はあちらというように，場合によって異なる状態に崩壊するだろう。違った状態に崩壊する放射性原子核についても，同じことが成り立つ。通常，特定の反応を調べるためには，数多くの事象が必要である。光を使った干渉実験では，多くの光子がスクリーンに当たらないと干渉パターンが見えてこない。素粒子物理で見ることができるのは粒子の軌跡，つまりなんらかの方法で測定された事象の記録だけなのである。それらの軌跡から何が起きたか推測すること，そしてたくさんの似たようなケースを集めてくることによって，ようやく理解に到達できる。

つまり，不安定な粒子ははっきりと決まった振る舞いをしない。例えば，中

性子は平均 10 分間程度で壊れる不安定な粒子である。中性子は崩壊して陽子，電子とニュートリノ[c]（現在の用語では反ニュートリノ）になる。だからといって，中性子はいつも 10 分間生きるとは限らない。5 分間生きることもあれば 10 秒間のこともあるし，30 分間のこともある。中性子が崩壊する事象を何回も観察することにより，物理学者が中性子の寿命（あるいは平均寿命）とよぶ平均値を決定することができる。このような確率的な振る舞いこそが，量子論の典型的な特徴である。平均値については非常に精密に予言することができるが，個々の事象についてはさまざまなことが起こる可能性がある。

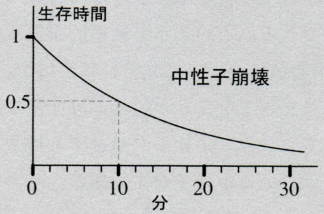
重要なことを注意しておこう。中性子が崩壊する様子を見れば，次のようなことに気づくだろう。はじめに中性子が 1 個ある。その中性子が消失すると，3 個の新しい粒子，すなわち，陽子，電子，反ニュートリノが現れる。つまり，粒子反応では，粒子が消滅したり新しい粒子が生まれたりする。この事実は非常に重要である。この現象，すなわち粒子をつくりだすことが，大型加速器を用いた研究の基礎になっている。不安定（しばらくすると崩壊してしまう）で，我々の周りの物質には存在しないような粒子でも，ある種の反応でつくりだすことができる。前に書いたように，中性子にはアップクォークが 1 個，ダウンクォークが 2 個存在している。中性子崩壊では，どちらかひとつのダウンクォークが，アップクォーク 1 個，電子 1 個，反ニュートリノに崩壊する。ダウンクォークがアップクォークに変わると，中性子が陽子に変わる。



興味深いことがもう一点ある。中性子は歳をとらない。つまり，生まれて間もない中性子と 10 分間以上生きている中性子は区別できない。したがって，すでに 10 分間生きている中性子が，さらに 10 分間生きる確率は，生まれたば

[c] ニュートリノは，我々の周りの物質には存在しない粒子である。中性子崩壊によって出てくる粒子のひとつとして発見された。

かりの中性子が10分間生きる確率と同じである。もし10分間生きている確率が0.5（つまり50%）なら，20分間生きている確率は50%の50%，つまり0.25になる。そして30分後に生きている確率は0.125だ。図のように，任意の時間後に中性子が崩壊する，あるいは生き延びる確率は計算でわかる。



この種の曲線を指数関数という。例えば10年ごとに人口が半減していく場合の世界人口なども，まったく同じような曲線を描く。もちろん，正反対に（発展途上国の）人口が15年で倍増する場合もある。そのような場合も，やはり指数関数で無限大に向かって急速に増加していく。たくさんの中性子があるとしよう。614秒後には半数が崩壊しているだろう。中性子の半減期として知られる時間である。素粒子物理学で用いられる寿命という言葉は，半減期を1.4427$=\frac{1}{\ln 2}$倍したものである。したがって，粒子の表に載っている中性子の寿命は885.7秒となる。

原子核中の中性子はどうして崩壊しないのだろう，と思うかもしれない。例えば，ヘリウムの原子核は陽子2個と中性子2個によってできている。重要なのは，このような崩壊はエネルギー保存則に反していることである。ヘリウムの原子核中の中性子が崩壊すると，中性子が1個少なくなり，陽子と電子，ニュートリノがそれぞれ1個ずつできる。問題は，ヘリウムの原子核から中性子を1個取り去って陽子で置き換えるためには，どの程度のエネルギーが必要なのかということだ。なぜなら実際に起こっているのが，まさにそのような現象だからである（電子やニュートリノは，中性子や陽子から強い力を受けないので飛び去ってしまう）。中性子を陽子で置き換えるには，ふつうは余計なエネルギーが必要になる。陽子がほかの2個の陽子と電気的に反発するからである。

少々違った角度から定式化してみよう。ヘリウム原子核から中性子を取り出すためには力を加えなければならない。このときに必要なエネルギーを束縛エネルギーという。大きさはふつう，数 MeV 程度だ[d]。ただし，重い原子核(例えばウラニウムの原子核には 146 個の中性子と 92 個の陽子が含まれる)の場合にはもう少し小さい。陽子の束縛エネルギーは，ふつう，中性子の束縛エネルギーよりも小さい。陽子を押しのけようとする電気力の存在などが理由である。原子核から陽子を取り除くほうが少しだけ簡単だともいえる。なぜなら，電気力が陽子を押し出す方向にはたらくからだ。陽子と中性子の束縛エネルギーの差を考慮すると，原子核中の中性子は通常の状態では崩壊できない。中性子の質量は陽子と電子の質量の合計よりも大きいが，その差はわずかだ(約 0.78 MeV)。中性子と陽子の束縛エネルギーの差が，この小さな質量差を超える場合には(多くの場合は超える)，原子核中の中性子は崩壊できない。逆に束縛エネルギーの差が質量差よりも小さい原子核では核中の中性子は崩壊できるし，実際に崩壊してしまう。このような崩壊は，β 放射能とよばれている。

放射能は 1896 年，ベクレル(Becquerel)によって発見された。続く放射能研究の発展において，ピエール・キュリーとマリー・キュリー，それからラザフォードが決定的な役割を果たしている。

読者の中には，原子核の中に中性子と陽子を結びつける非常に強い力が存在することに気づいている人がいるかもしれない。この力は常に引力としてはたらくわけではないが，電気力よりもずっと強い。もうひとつ特徴的なのは，この力は遠くまで届かないことである。つまり原子核の外に出ると，急速に減衰して弱くなる。強い力とよばれるこの力は，中性子や陽子の中でクォークを結びつけている力と本質的に同じである。電子やニュートリノにははたらかない。

1.6 電子ボルト(eV)とその他の単位

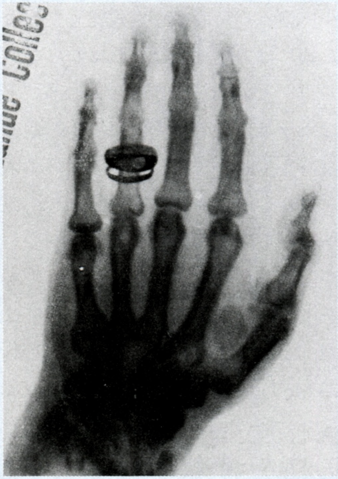
測定における単位について少しふれておこう。

この本で使うエネルギーの単位には，eV (電子ボルト)をはじめとして，MeV (メガ電子ボルト，1 MeV＝1000 000 eV)，GeV (ギガ電子ボルト，1 GeV＝1000 MeV)

---

d MeV というエネルギー単位については本章の後半で説明する。





ヴィルヘルム・レントゲン(Wilhelm Röntgen, 1845-1923) レントゲンはX線を発見した。右側の写真は1895年12月22日に撮影したもので,X線を用いて人体を撮った初めての写真である。その年の12月28日に行われたレントゲンの発表は,世界を興奮の渦に巻き込んだ。翌年1月13日,彼は自分の大発明をベルリンのヴィルヘルム2世に実演して見せている。レントゲンの発明に刺激されたベクレルは,蛍光とX線には関係があると考えた。そして蛍光を研究するうちに,実際に放射能を発見する。さらに1899年,2人のオランダ人物理学者,ハガ(Haga)とヴィント(Wind)がX線の本質が波だということを立証した。1912年には,フォン・ラウエ(von Laue, 1914年ノーベル賞受賞)が卓越した考えに基づいた実験によって,X線の波長を厳密に測定した。X線は超紫外の光で10^{-9} cm程度の波長をもっていることがわかった(青色光の波長は4000Å$=4\times10^{-5}$ cm)。

ジャーナリストが行ったレントゲンへのインタビューに,次のような一節がある。

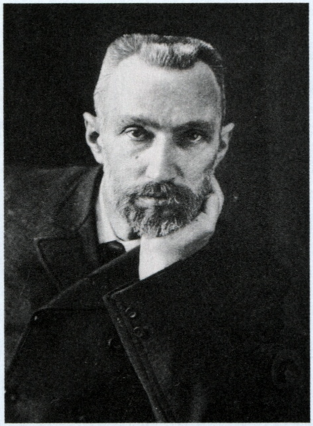
J:何を考えていたのですか? R:何も考えなかった。調べただけです。

J:何を調べていたのですか? R:わかりません。

おもしろいことに,発見当時のレントゲンはヴュルツブルグ大学の学長であった。

X線抜きの現代医療など考えにくい。ノーベル賞の精神(人類のために偉大な貢献を行った人物)にもっともよく当てはまる人物がいるなら,レントゲン以外に考えられない。第1回ノーベル物理学賞は1901年,レントゲンに贈られた。とても内気なレントゲンは,晩餐会ではすばらしいスピーチを披露したにもかかわらず,終生受賞講演を行うことはなかった。次に病院へ行くときには,ぜひこの内気な人物を思い出してほしい。





マリー・キュリー-スクロドフスカ(Marie Curie-Sklodowska, 1867-1934)と彼女の夫，**ピエール・キュリー**(Pierre Curie, 1859-1906)。キュリー夫妻は，ウラニウム以外にも放射性元素(この用語はマリーが提唱した)があること，有名なポロニウム(マリーが生まれた国に由来して名づけられた)やラジウムなどを発見した。ラジウムは瀝青ウラン鉱にごく微量含まれる物質で，熱(原子力エネルギー)を発する。1 時間で，ラジウム 1 g で 1.3 g の水を融点から沸点に熱することができる。キュリー夫妻は，多量の瀝青ウラン鉱を解析した。おそらく鉱山から出た残りかすから抽出したのだろう。ピエールは交通事故で早世し，マリーは深い悲しみに襲われた。長期間にわたる放射性物質の研究生活も，彼女の死の一因だったと考えてよいだろう。夫の死から 28 年後のことだった。

ノーベル賞を受賞した初の女性(ベクレルと彼女の夫ピエールとともに 1903 年受賞)というだけではない。マリーはノーベル賞を 2 度受賞した初めての人物でもある(ラジウムとポロニウムの発見，ラジウムの分離，およびこの驚くべき元素の性質と化合物の研究による化学の発展への貢献に対し 1911 年に化学賞受賞)。彼女以外にノーベル物理学賞を受賞した女性は 1 人だけ，マリア・ゲッパート-メイヤー(Maria Goeppert-Mayer)が，原子核物理学における業績で受賞している(1963 年受賞)。ただし，1944 年に核分裂に関する研究(この研究をきっかけとして原子炉や原子爆弾の研究が始まった)に対してオットー・ハーン(Otto Hahn, 1879-1968)がノーベル化学賞を受賞したときに，実際は共同研究だったにもかかわらず，リーゼ・マイトナー (Lise Meitner, 1878-1968)に賞が与えられなかったことは一種のスキャンダルとなっている。男性優越主義の典型といえるこの事件を，今日のスウェーデン国民は非常に恥じていることを付け加えておく。同じような例に，第 2 章のパウエルの人物紹介ページに出てくるマリエッタ・ブロウ(Marietta Blau)の話がある。

それに TeV (テラ電子ボルト，1 TeV＝1000 GeV) などがある。1 eV は，1 ボルトの電位差がある電場を電子が通り抜けるときにもらうエネルギーである。テレビ画面を光らせる電子は，数千 eV (数 keV，キロ電子ボルト) のエネルギーをもっている。というのは，ブラウン管の中では数千ボルトの電圧をかけて電子を加速しているからだ。

電子ボルトはとても小さな単位である。1 eV＝1.602×10^{-19} ジュール。1 ジュールは 10^7 エルグ＝1 ワット秒＝1/3600 000 キロワット時。

第2次世界大戦前の素粒子加速器では，最大でもわずか 16 MeV にすぎなかった粒子のエネルギーが，今日では 1 TeV＝1000 000 MeV にまで達している。これは，半径 1 km もの円形加速器のおかげである。宇宙線における粒子のエネルギーは最大で 10^{21} eV＝10^9 TeV にまで達する。だが宇宙のはるか彼方でどのような加速器が動いているのかはわかっていない。現在の技術で，宇宙線と同程度のエネルギーをつくりだすには，直径 10 億 km 以上の加速器が必要である。地球から太陽まで (1 億 4960 万 km) の 6 倍以上の距離だ。素粒子物理学では，エネルギーが非常に高い粒子，つまり光速に近い速度の粒子を扱うことが多い。光の速度は通常 c で表される。よく使われる定数である。光速は，速度測定の単位としてとても便利である。高速で飛ぶ飛行機の速度を表すのに音速，つまりマッハ (Mach) を用いるのと似たようなものだ。ここでは，c が 1 に等しくなるような長さと時間の単位を使おう。

真空中の光の速度は 299 792.458 km/s だが，だいたい 300 000 km/s，または 3×10^{10} cm/s と考えてよい。電波や光について語るとき，波長という言葉を使う。波長と振動数の関係は，$\lambda=c/\nu$ あるいは $\nu=c/\lambda$ と表すことができる。波長が 8000 Å (8×10^{-5} cm，赤色光) なら，振動数は $\frac{3}{8}\times10^9$ Mhz だ。300 m の波長なら振動数は 1 Mhz になる。

アインシュタインのおかげで，我々は質量とエネルギーが本質的に等しいこと ($E=mc^2$) を知っている。つまり，エネルギーの単位は質量の単位としても使うことができる。さらに，あらかじめ c は 1 になるように選んであるので，質量は直接 eV で表す (素粒子の質量については，MeV か GeV を使うほうが便利だが) ことができる。

もうひとつなじみ深い定数が，h で表されるプランク定数である。こちらは，与えられた振動数または波長の光子がもつエネルギーを表すのに使われる。この定数の値は $h=4.135\,667\,27\times10^{-21}$ MeV 秒である。波長の決まった光や電波は，エネルギー $E=h\nu$ をもつ光子からなっている。アインシュタインの関係式 $E=mc^2$ に劣らずきわめて簡単で重要なこの式は，すべての量子現象のスケールを決めている。

例として，1 Ghz = 1000 Mhz の振動数，つまり 1 秒間に 10 億回振動する電磁波を用いる携帯電話を考えてみよう。電話のアンテナからは，1 個あたり $h\times1000\,000\,000 = 4.14\times10^{-12}$ MeV のエネルギーをもつ光子が次々と流れ出ている。赤色光(振動数は約 400 000 Ghz，波長は 7500 Å)の光子 1 個は 1.65 eV のエネルギーをもつ。

量子物理学では，2π で割ったプランク定数を用いることが多い。もちろん 3.14…の π である。この組み合わせ $\hbar=(2\pi)^{-1}h$ もまたプランク定数(あるいはエイチバー)とよばれるが，これを 1 におくことが多い。

ある定数を 1 にするためには，そうなるように他の測定量の単位を選びなおす必要がある。この場合，長さ，時間とエネルギーの単位をうまく選んで，c と $\hbar$ が 1 になるようにできる。このような単位を自然単位とよぶ。

MeV をエネルギーの単位とすると，時間の単位は $\hbar=6.582118\times10^{-22}$ 秒，長さの単位は $\hbar c=1.97327\times10^{-11}$ cm (原子の大きさの約 1/250)となる。そうすると 1 という速度は，$1.97327\times10^{-11}/6.582\,118\times10^{-22}\approx3\times10^{10}$ cm/秒，つまり，光速と等しくなる。巨視的状況を扱う場合には，自然単位は明らかに使いづらい。

光速とプランク定数がそれぞれ 1 になるようにしたおかげで，素粒子物理学者は随分楽になった。

1.7 粒子の名前とギリシア文字

相次ぐ新粒子の発見によって，ややこしくなったのが粒子をどうよぶかという問題である。たいていはギリシア文字を使う。例えば初期に発見された粒子の

ひとつであるミューオン(ミュー粒子)はμで表し，ミューと発音する。ラテン文字を使用することも多い。例えばKで表すK中間子(ケーオン)や，WやZがそうだ。ミューオン以前にもニュートリノ(中性微子)があった。この名前は中性子(ニュートロン)から派生したイタリア語だ。中性子もニュートリノもどちらも電荷をもたないのでこの名前がついた。ニュートリノの質量は非常に小さく，ほとんど0だ。中性子のほうは非常に重いことを考えれば，名前の由来は想像できるだろう。イタリア語には，小さいことを示す接尾語がたくさんあるので，ニュートレット(neutretto)やニュートレロ(neutrello)，あるいはニュートリネロ(neutrinello)とよんでもよかった。一方，表記については，すぐにギリシア文字νで表すようになった。

本書を読み進むにつれて読み方もわかってくるだろうが，ここでギリシア語のアルファベットについてまとめておこう。それほど大きく違うわけではないけれど，同じ文字にも2種類の字体がある場合がある。もちろん，大文字もある。一対一に完全対応しているわけではないが，ラテン文字とギリシア文字は，ある程度読み方順に並べられる。

α	アルファ	β	ベータ	δ	デルタ	ϵ, ε	イプシロン
ϕ, φ	ファイ	γ	ガンマ	η	エータ	ι	イオタ
κ	カッパ	λ	ラムダ	μ	ミュー	ν	ニュー
ω	オメガ	o	オミクロン	π, ϖ	パイ	ρ, ϱ	ロー
σ, ς	シグマ	τ	タウ	υ	ウプシロン	ξ	グザイ
ζ	ゼータ	ψ	プサイ	θ, ϑ	シータ	χ	カイ

大文字を，ギリシア文字の順番に並べると

Γ	ガンマ	Δ	デルタ	Θ	シータ	Λ	ラムダ
Ξ	グザイ	Π	パイ	Σ	シグマ	Υ	ウプシロン
Φ	ファイ	Ψ	プサイ	Ω	オメガ		

この他の大文字の中には，ラテン文字とまったく同じものも数多い。

A	アルファ	B	ベータ	E	イプシロン	Z	ゼータ
H	エータ	I	イオタ	K	カッパ	M	ミュー
N	ニュー	O	オミクロン	P	ロー	T	タウ
X	カイ						

1.8　科学的記数法

原子はとても小さい。水素原子の大きさは約 1 Åだ。記号「Å」はオングストロームとよび，1 億分の 1 cm，あるいは 0.000 000 01 cm のことをいう。最近よく使われるのはÅの 10 倍大きいナノメートルという単位である。つまり 1 nm＝10 Åだ。ゼロがたくさんあるときは科学的記数法を使えばよい。例えば，$1\,\text{Å}=10^{-8}\,\text{cm}=10^{-10}\,\text{m}$ となる。科学的記数法では，2.5 Åは $2.5\times10^{-8}\,\text{cm}$ と表すが，これは 0.000 000 025 cm のことである。基本的な単位はメートルだ(それに m を基準に定義された cm なども)。

小数点の前に 0 がたくさんついた大きな数を表すときも，同じ科学的記数法を使う。例えば $2.5\,\text{m}=2.5\times10^{+9}\,\text{nm}=2500\,000\,000\,\text{nm}$ となる。ゼロは 9 個ではなく 8 個である点に注意すること。2.5 には小数点より上に 1 桁ある。特殊な場合をのぞいては＋は省略するので，実際の表記は $2.5\times10^{9}\,\text{nm}$ になる。

小数点以上の桁の数を表にしよう。

デカ	ヘクト	キロ	メガ	ギガ	テラ	ペタ	エクサ	ゼッタ	ヨッタ
10	10^{2}	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}

だから 1 kg は 1000 g である。

小数点の後にゼロがある場合には，負の指数を使う。

10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}
デシ	センチ	ミリ	マイクロ	ナノ	ピコ	フェムト	アト	ゼプト	ヨクト

2 標準モデル

2.1 序　論

本章ではこれまでに発見された粒子とその間にはたらく力について，現時点でわかっていることを紹介しよう。これらをまとめて標準モデルという。きちんとした計算規則が確立した美しい体系で，実験結果ともよく一致している。もちろん未解決な謎は数多く残っており，それらの謎が解明されるまでには，しばらく時間がかかるであろう。それでも標準モデルは，自然に関する膨大な知識の集大成であり，物理学の 400 年の歴史の中でも最高の理論体系とよぶにふさわしい。

すべての物質が原子の集まりだということ，そして原子には原子核があり，その周りを電子が回っているということは広く知れ渡っている。原子核は陽子と中性子からなっており，陽子と中性子はクォークからなっている[a]。原子核中を動き回っているものはほかにもたくさんあるが，おおまかな図式はこれで十分である。もっとも単純な原子は水素原子で，陽子 1 個の周りを電子が 1 個回っている。水素原子は水の中にある。ほかの物質はもう少し複雑だが，原子，電子，原子核，陽子，中性子，クォークという基本的な構成要素は共通している。

---

[a] クォークという名前は，ジェームス・ジョイス(James Joyce)のフィネガンズ・ウェイクという本の一節にちなんでゲルマンがつけたものである。クォークは，1963 年に 2 人の人物，ゲルマンとジョージ・ツヴァイクによって独立に提唱された。ツヴァイクはクォークをエースやジュースとよんだが，このよび方は定着しなかった。この件については，ロバート・サーバー(Robert Serber)とロバート・クリース(Robert Crease)の *Peace and War*，200 頁を参照のこと。

ヘンドリック・ローレンツ(Hendrik A. Lorentz, 1853-1928)と**ピーター・ゼーマン**(Pieter Zeeman, 1865-1943)。電磁場が荷電粒子，特に電子におよぼす力の法則を完成させたのがローレンツである。1896年，原子が放出する光に対する磁場の影響を発見したのが，実験物理学者のゼーマンである。ローレンツとの密接な共同研究の末に，ゼーマンは，自分の発見が原子中の電子に対する磁場の影響だということを突き止めた。だが彼らは電子の発見には至らず，電子発見の栄誉はJ. J. トムソンが手にした。ローレンツとゼーマンは，ともに1902年第2回ノーベル賞を受賞している。

ローレンツは，相対性理論分野での研究でも有名である。彼は，アインシュタインに先立って，動いている物体の長さが縮むことを示す式を導いた。動いている人の時計がゆっくり進むことも含めて，相対性理論を完成させたのはアインシュタインである。動く物体に関する完全な公式は，ローレンツ変換とよばれている。アインシュタインはたびたび，ローレンツに多大な敬意を抱いている，と述べている。ローレンツの葬式当日，葬列が通る道の街灯は1本残らず黒い布で飾られた。オランダの電報局は，正午に3分間業務を停止して弔意を表した。葬儀で弔辞を述べたのは，ラザフォードとアインシュタインだった。

長さが縮むという考えを思いついたという点では，創意に富んだアイルランドの物理学者，フィッツジェラルド(FitzGerald)も同列である(ただし，実際に式を書いたわけではない)。とても良心的な人物だったローレンツは，フィッツジェラルドの研究を知った後の講演では，彼の功績への言及を欠かさなかった。

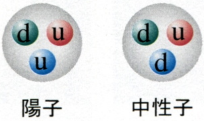


ジョン・トムソン(John J. Thomson, 1865-1940)　一般に電子の発見者として知られるトムソンは，1899 年，電子の質量をおおまかに決定した人物だ。当時，質量を導き出すためには，磁場中の運動から粒子の電荷と質量の比を測定し，さらに電荷を測定しなければならなかった。ローレンツとゼーマンは，電荷／質量比に関してはかなりよい値を導き出していた。だが残念なことに，電荷を測定したり，文献に出ている電荷の値を用いたりはしなかった。トムソンは 1906 年にノーベル賞を受賞している。

トムソンは電子の電荷を測るのに，(霧箱で有名な)学生のチャールズ・ウィルソン(Charles Wilson)が開発した手法を用いた。この手法は，荷電粒子の周りの水蒸気が凝結して水滴になる性質を利用している。

トムソンがもっともすばらしい理論的研究を行ったのは 1906 年頃だった。原子の中にある粒子の数は原子量にほぼ等しい，という重要な点に気づいたのだ。さらに彼は，正の電荷をもつ粒子(今の言葉でいうと陽子だが)の質量は，電子の質量よりも軽くないという点にも気がついた。実際には，陽子の質量は電子の約 2000 倍である。トムソンは原子モデルを完成させようとしていたが，後の論文から明らかなように，彼の説は間違っていた。謎の解明には，ボーアの登場を待たねばならない。

身の回りのものすべて，テーブルも手もどのような物体も素粒子でできていると意識すると，不思議な気分になる。現代的な見方では，素粒子の間にはたらく力は素粒子の交換によって起きると考える。交換される素粒子は生まれたり消えたりを繰り返している。さらに，物質の性質はすべて構成要素の素粒子の性質によって決まっている。このような見方をすると，普段は強調されていない事実が大変重要な意味をもつようになる。とりわけ衝撃的な例は，2 種類のクォーク，つまりアップクォーク(u)とダウンクォーク(d)の質量の差だ。これらのクォークは，陽子と中性子をつくっている。アップクォーク 2 個とダウンクォーク 1 個でできているのが陽子，アップクォーク 1 個とダウンクォーク 2 個は中性子である。



クォークには，赤・緑・青の3色がある。質量は等しい。2個あるダウンクォークの片方がアップクォークに変わると，中性子は陽子に変わる。ダウンクォークはアップクォークよりも重い。だから，ダウンクォークは崩壊してアップクォーク(と電子 1 個と反ニュートリノ)になることができる。ほかのクォークについては本章の後半で紹介する。実験的に確認されている質量についてもふれるつもりである。クォークの質量の値には決まったパターンがある。このあたりが興味深い点なのだが，これらのパターンだけをもとに推測するように求められた場合，アップクォークはダウンクォークよりも重いと思う人がいるかもしれない。だが，実際にはダウンクォークのほうが重い。重いということは，崩壊できるということだ。だから中性子は不安定なのである。どちらかのダウンクォークが崩壊してアップクォークになると，中性子は陽子(とほかの粒子)になる。このわずかな質量の差が，原子核物理学において，ひいては現存するすべての物質にとって大変重要なのである。アップクォークがダウンクォークよりも重ければ，世界の様子はまったく変わってしまうはずだ。太陽は光らなくなる。中性子が崩壊しなくなるためである。さらに中性子ではなく，陽子が不安定になるだろう。水素(その原子核は陽子 1 個だ)は安定な物質として存在しなくなるだろうから，水もなくなってしまう。陽子は安定であるにこしたこ

ロバート・ミリカン(Robert Millikan, 1868-1953)と，弟子の**カール・アンダーソン**(Carl Anderson, 1905-1991)。ミリカンは電子の電荷を測定し，光電効果に関するアインシュタインの研究を実験的に立証した。そして 1923 年, ノーベル賞を受賞する。ミリカンは宇宙線研究の先駆者でもあった。一方，アンダーソンは電子の反粒子である陽電子の発見者である。1932 年におけるアンダーソンの実験は，ディラックが提唱した反粒子という考えを証明するものだった。ディラックの理論をよく知らなかったというアンダーソンの言葉を借りれば，「陽電子の発見はまったくの偶然だった」のだが。1936 年のノーベル賞は，半分はアンダーソンを，もう半分は(宇宙線の発見に対して)ヘス(Hess)を称えるものだった。

アンダーソンは，強力な磁場をかけた霧箱をつくった。磁場をかけたのは荷電粒子の軌道を曲げるためである。ミリカンの勧めもあって霧箱による宇宙線の観測を始めたアンダーソンは，「下から上に飛んでいく電子」の写真を見つけた。だが，ミリカンは「宇宙線の粒子は上から下に飛んでいくのが常識だ」と告げた。種明かしをすれば，当初のアンダーソンは，上から下に飛んでいた陽電子を磁場中を「反対方向に」運動する電子であると解釈したのである。

ほぼ同時期に, 海を隔てたイギリスでも, ブラケット(1948 年ノーベル賞受賞)とオッキャリーニが陽電子を発見していた。自分たちの発見したのが陽電子であるというブラケット達の解釈は正しかった。だが宣伝能力に長けたミリカンの助けもあって，先にサイエンス誌に速報を発表したのはアンダーソンだった。なお，アンダーソンのフィジカル・レヴュー誌における公式な発表は，ブラケットとオッキャリーニの王立協会報への発表の 3 か月後のことであった。

とはない！

陽子と電子の質量は大きく違う。実は，陽子の質量は電子や陽電子の 1800 倍以上ある。陽電子は，電子の反粒子である。質量は電子と同じだが，電荷は逆だ。歴史的には，初めて観測された反粒子でもある。観測したのはアンダーソン，1932 年のことだった。エネルギーという観点だけから見ると，陽子は，陽電子とその他の粒子へと崩壊することができる。だが，幸いにも別の自然法則によって禁止されているために，そのような崩壊は起こらない。

2.2 エネルギーと電荷の保存

安定な粒子もあれば，不安定な粒子もある。ここで，とりわけ重要な規則がエネルギー保存則である。どのような反応においても，終状態のエネルギーと始めのエネルギーは等しい。ある質量をもつ粒子のエネルギーは，アインシュタインの $E=mc^2$ という式によって求められる。ある粒子が崩壊するためには，崩壊で生じる粒子の質量の和が，もとの粒子の質量よりも小さくなければならない。質量が 100 MeV の粒子は，質量の合計が 100 MeV 以上ある粒子 2 個に崩壊することはできない。エネルギー保存則に反するからである。この法則はもっとも厳密な法則である。重い粒子は十分なエネルギーをもつので，不安定になりがちである。余分なエネルギーは，崩壊後に出てくる粒子の運動エネルギーに変わる。

中性子の崩壊について，もう一度考えてみよう。中性子の質量は 939.57 MeV で，陽子 1 個と電子 1 個，それから反ニュートリノに崩壊する。

$$\text{中性子} \longrightarrow \text{陽子} + \text{電子} + \text{反ニュートリノ}$$

陽子の質量は 938.27 MeV，電子の質量は 0.511 MeV で，反ニュートリノの質量は非常に小さく，ほとんど 0 である。すぐにわかるように，電子と陽子の質量を合計すると 938.78 MeV であり，中性子の質量よりも 0.79 MeV 軽い。エネルギー的には，中性子は崩壊することができる。余ったエネルギーは，反応で生じた陽子，電子と反ニュートリノの運動エネルギーに変わる。

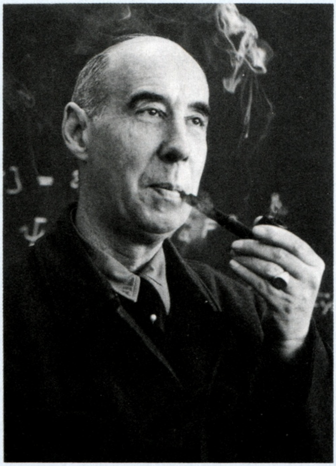
だが，エネルギーのバランスだけがすべてではない。例えば，なぜ反ニュートリノが出てくる必要があるのだろうか。なぜ陽子は安定なのだろう？　エネ

ルギー的には，陽子は，例えば電子1個とニュートリノ1個に崩壊することができる。だが，電荷の保存という重要な概念が崩壊を防いでいる。電荷は，いつでも厳密に保存される。陽子の電荷は電子と逆なので，もし陽子が崩壊すると，終状態(電子1個と電気的に中性なニュートリノ)と始状態(陽子)の電荷が変わってしまう。このように，エネルギー保存則以外の保存則によって，ある種の反応が禁止されることもある。素粒子が発見されるはるか昔から，電荷保存則は電磁気学の基本法則だった。素粒子のスケールの世界における保存則は何種類かあるが，そのうちのいくつかはマクロ世界においても同じように成り立つ。なかでも重要なのが，電荷保存則とエネルギー保存則である。

素粒子レベルの電荷には，とびとびの値をとるという非常に特殊な性質がある。電子の電荷が -1 になるように電荷の単位を決めると，観測される電荷は整数になる。ただし，クォークの場合には $\frac{1}{3}$ の倍数になる。言い換えれば，電荷はとびとびの値に量子化されている。このような保存則は足し算で表せる。電荷は整数になっているので，粒子が何個かある場合には，各々の粒子の電荷を足せばいい。そのような数を電荷数とよぼう。電荷が保存されるということは，始状態の電荷数と終状態の電荷数が同じということだ。例えば中性子崩壊(中性子 → 陽子＋電子＋反ニュートリノ)では，始状態の電荷数は0となる。崩壊後の値，つまり $+1$ (陽子)と -1 (電子)を足してみると0になり，始状態と等しい。電荷のことを**量子数**とよんでもよい。量子数は保存される。粒子の電荷は，これから見ていく量子数の最初の例である。

2.3 量 子 数

自然界の法則として電荷の保存を考慮するだけでは，陽子が安定な理由は説明できない。電荷の総和が $+1$ で，全質量が陽子の質量よりも軽い状態が存在すれば，陽子はその状態に崩壊することができるはずだからである。さまざまな組み合わせが考えられるが，例えばエネルギーと電荷だけを考えた場合，陽子は陽電子1個といくつかのニュートリノに崩壊できる。陽電子2個と，電子1個でも大丈夫だ。陽電子は電子の反粒子で質量は電子と同じだが，電荷は逆符号，つまり正だ。では，なぜ陽子は陽電子とニュートリノへと崩壊しないのだろう？



エルンスト・シュテュッケルベルク・フォン・ブライデンバッハ・ツー・ブライデンシュタイン・ウント・メルスバッハ(Ernest Stückelberg von Breidenbach zu Breidenstein und Melsbach，1905–1984）　バリオン数という概念を考えついた卓越した物理学者であるシュテュッケルベルクほどの功績があれば，ノーベル賞を授与されても不思議ではない。しかし入手困難なヘルベチカ・フィジカ・アクタ誌への投稿が主だった上，著作の大半が英語ではなかったこともあり，彼の研究はあまり知られていない。原子核の間にはたらく力は有限の距離しか届かないこと(1949 年に湯川秀樹がノーベル賞を受賞)を示唆したのも，場の量子論の内容を，後のファインマン(第 9 章の素粒子論の項目を参照)と同じような形で発展させたのも彼なのだ。シュテュッケルベルクは躁鬱気質だった。高齢になってからは小さな犬を連れ歩いていた。迷子になった彼を自宅に連れ帰るためだったらしい。シュテュッケルベルクの講演にはいつもこの犬がいた。犬が聴衆の質問に答えたのを見たことすらある(犬がひと吼えで T. D. リーの質問に答えたとき，シュテュッケルベルクは黙って見ているだけだった)。シュテュッケルベルクには，必要になるかもしれない論文と雑誌をすべて旅行先に持っていく習慣があった。どんな小旅行にも，大きなスーツケースやトランクをたくさん抱えていった。R. クリースと C. マンの著作†『セカンド・クリエイション』の 236 ページに，シュテュッケルベルクへのインタビュー記事が載っている。なかでも印象深い一節は「我々は長生きしすぎる」という別れの言葉である。

---

† （訳者注)鎮目恭夫・林一・小原洋二訳　早川書房(1991 年) ISBN 4-15-203502-1。

1938年，スイスの理論物理学者シュテュッケルベルクはすばらしいことを思いついた。電荷以外にも別の量子数があるのではないか？　普通の反応では，その量子数はいつも保存されているので，我々が気づいていないだけではないのか？　そして陽子が崩壊する場合には，その保存則が破れるのではないだろうか？　電荷を観測するのは簡単である。測定器中で素粒子が描く軌道は電荷によって決まるからだ。だが電荷という量子数が直接見えるからといって，直接見えない量子数が存在しないとは限らない。

シュテュッケルベルクの考えはすばらしい。だが，どうやって証明すればよいのだろう？　本質的には「見えない」量子数を，どうやって探し当てればいいのだろう。こういった場合，一般的には粒子反応の実験を繰り返し，起こる反応と起こらない反応を分類してリストを作るという方法をとる。例えば，中性子は崩壊すると，陽子1個と電子1個，それに反ニュートリノ1個になる。電子1個と陽電子1個のほうが，はるかに質量が軽く（939 MeVに比べてたったの1 MeV）電荷も0なのに，中性子はこの組み合わせには決して崩壊しない。起きる反応と起きない反応のリストができたら，説明のための新しい量子数を考えて名前をつける。次に，実際に起きる反応が保存則を満たし，起こらなかった反応は保存則を満たさないように，個々の粒子に量子数を当てはめてゆけばよい。観察した反応を系統立てて分類するだけである。深遠な理論があるわけではなく，単なる試行錯誤の連続だ。

この方法は大変有効である。素粒子の表には，うまく当てはまった量子数が載せてある。まさに現象論の世界だ。例えば，バリオン数という量子数がある。中性子と陽子のバリオン数を+1だと仮定する。電子，陽電子，ニュートリノのバリオン数はすべて0とする。自然界がバリオン数を一定に保っているなら，中性子は，陽子と電子と反ニュートリノに崩壊することはあっても，電子と陽電子には崩壊しない。一般に，ある粒子の量子数が決まっているとき，反粒子の量子数の符号は逆になる。この点は先の章で詳しく紹介する「クロッシング」とよばれる概念と深い関係にあるが，現時点では反陽子と反中性子のバリオン数が−1になることがわかればいい。

ほかの量子数についても順次説明していこう。今述べたような，陽子を安定に保つ量子数をバリオン数という。パイス（彼はレプトンという言葉を使いだした人物でもある）が使いだしたバリオンという言葉は，ギリシア語の重いと

いう単語に由来している。

陽子が不安定にならないようにバリオン数という考え方を導入したのは，シュテュッケルベルクである。彼は，電荷と同じように保存されるものとして，「重電荷(heavy charge)」という単語を用いた。その後，学術用語を体系化する際に使われ出したのが，バリオン数という専門用語である。まず，陽子と中性子のバリオン数を+1とする。光子や電子，陽電子やニュートリノのバリオン数は0と仮定する。バリオン数をこのように定めると，バリオン数の保存則によって，陽子は陽電子といくつかのニュートリノに崩壊することができなくなる。

バリオン数保存則が成り立つのは，陽子の安定性に限らない。一般的に成り立つ法則なのだ。陽子が崩壊するかどうかという点は，もっとも厳密な試金石だが，バリオン数保存則は，陽子–陽子，あるいは陽子–中性子の衝突でも同様に成り立つ。どちらの衝突においても，終状態のバリオン数は+2になるはずだ。例えば陽子2個，あるいは中性子2個とほかの物質でもかまわない。だが，

$$\text{陽子} + \text{陽子} \longrightarrow \text{陽子} + \text{陽子} + \text{中性子}$$

という反応は起こらないはずだし，観測例もない。始状態のバリオン数は+2なのに，終状態のバリオン数は+3になるからである。一方，次のような反応は起こりうる。

$$\text{陽子} + \text{陽子} \longrightarrow \text{陽子} + \text{陽子} + \text{中性子} + \overline{\text{中性子}}$$

実際，$\overline{\text{中性子}}$は反中性子を表すが，そのバリオン数は−1なので，終状態のバリオン数は+2で，始状態と同じになる。

2.4　色

素粒子の表の中には，特にクォーク関連の新しい量子数が出てくる。これら3種類の量子数には，電荷と似ている部分も多い。それぞれ赤色電荷，青色電荷，緑色電荷とよばれている。どのクォークにも，緑，赤，青の3種類がある。無色のクォークは存在しない。赤，青，緑のクォークに対応して，赤色電荷，青

色電荷および緑色電荷の3つの量子数(色電荷)があり，それぞれが保存されると考える。さらに赤色電荷が負の場合もある。これを反赤とよぶことにする。同じことは青と緑についてもいえる。クォークは負の色電荷をもたない。負の色電荷をもつのは反クォークである。つまり，アップクォークには，それぞれ赤色電荷1，青色電荷1，緑色電荷1をもつ3種類があり，反アップクォークにも，それぞれ赤色電荷−1，青色電荷−1，緑色電荷−1をもつ3種類がある。赤色電荷が1のクォークを赤クォーク，というように，それぞれのクォークをよぶことにしよう。反赤の反クォークは，$\overline{\text{赤クォーク}}$と書く。

ここでグルーオンを紹介しておこう。グルーオンは質量0で，クォークと相互作用する粒子だ。グルーオンとクォークの関係は，光子と電子の関係と似ている。グルーオンは，クォーク間にはたらく力の元になる。光子が，電子間にはたらく電気的な力の元であるのと同じである。グルーオンにも色電荷がある。正確には，色電荷を1単位と反色電荷を1単位もっており，例えば，赤-反青グルーオンなどがある。光子が電荷をもつ粒子としか相互作用しないのと同じように，グルーオンは色をもつ粒子としか相互作用しない。このあたりについては，本節後半で詳しく述べよう。

電荷と色電荷の間には重要な違いがある。色電荷が1種類しかなければ，どのような反応でも色電価は保存される。電荷と同じである。だが，色電荷は1種類だけではないので，電荷とまったく同じというわけにはいかない。以下に述べるように，3色を足し合わせると中性色(無色)になる。

マクロな世界では，色電荷は決して見ることができない。クォークが単独に分離して存在することはないからである。つまり，我々の周りにある安定な物質はクォークがくっついた状態，つまり束縛状態になっており，色電荷に関しては中性で，色をもたないものばかりからなっているということだ。電気的に中性になっている原子と同じように考えればいい。この点について，別の角度からもう少し詳しく見てみよう。さらに，なぜ色という言葉を用いてこのような量子数を表すのかについても，もう少しわかりやすく説明しよう。

赤，青，緑を同じ分量だけ含む特別の組み合わせは，色として無色になる。つまり，次のように考えればよい。

クォークがいくつか集まって束縛状態になっているとしよう。グルーオンとその束縛状態の相互作用は，グルーオンと個々のクォークとの相互作用の組み

合わせになる。赤，青，緑，3色のクォークをうまく組み合わせて束縛状態をつくると，グルーオンと相互作用しない組み合わせができる。残念ながら，この点については，クォークからどのようにして束縛状態ができるか知らないと難しい。しかし結論は簡潔である。赤，青，緑を同量ずつ組み合わせると白色になり，グルーオンと相互作用しなくなるのである。ちょうど，赤色光，青色光，緑色光を同量混ぜて白色光をつくるようなものである。したがって，陽子や中性子では，構成要素のクォーク3個のうち1個が赤，もう1個が青，最後の1個が緑になっている。ただし，どれがどの色かはわからない。3個のクォークが，絶え間なく色を交換しているからだ。クォークどうしがグルーオンをやりとりすると，色交換が起きる。だから，3個のクォークの組み合わせが中性色になるのは，陽子や中性子中におけるクォークのスピンまで含めて，非常に特別な組み合わせのときだけである。

水素原子を例に考えてみよう。原子核の陽子は電荷をもっており，周りを回る電子にも電荷がある。だが，電子の電荷が陽子の電荷の逆符号なので，原子全体としては電気的に中性になる。同じように，陽子あるいは中性子中の3個のクォークの色は，全体としてみれば無色になっており，遠くからは色電荷をもたないように見える。

少し難しいだろうか。理論として確立しているとはいえ，直感的に理解できる水準の話ではない。だが，素粒子物理学や量子力学の世界では，そういうことが多い。物事について綿密に計算することは可能だが，同じことを簡単に「理解する」のは難しいのだ。ミクロ物理学の不可思議な世界は，我々のマクロ世界とはまったく異なっている。色電荷が，普通の色と同じように振る舞うのはとてもありがたい。反色という言葉でさえ意味をもつからだ。白色光から赤色を抜き取ると，反赤が残るようにみえる。

陽子のバリオン数は1なので，陽子中のクォーク3個それぞれのバリオン数は $\frac{1}{3}$ ということになる。つまり，クォークには色の量子数とバリオン数がある。さらに電荷もある。クォークの電荷は $+\frac{2}{3}$ か $-\frac{1}{3}$，反クォークの電荷は $-\frac{2}{3}$ か $+\frac{1}{3}$ だ。陽子は電荷が $+\frac{2}{3}$ のクォーク2個と $-\frac{1}{3}$ のクォーク1個からなっているので，電荷の合計は1になる。色的に中性なクォークの組み合わせの電荷は常に整数になることがわかっている。$-\frac{7}{3}$ や $+\frac{5}{3}$ には決してならないのである。

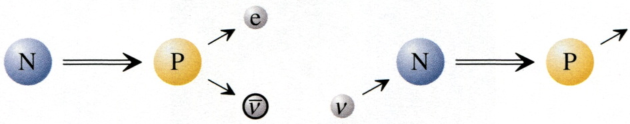
クォークの束縛状態に色がない理由は，ある程度理論的にわかっている。したがって，なぜ電荷には整数値しか存在しないのかも説明できる。だが，色のついた束縛状態や自由粒子が決して出現しないという厳密な理論的証明はされていない。この証明は，**色の閉じ込め**とよばれている。クォークがいくつか集まって，色のない束縛状態ができているとしよう。この中から1個のクォークを取り出すと色のついた束縛状態が残ることになるので，クォーク単体を取り出すことは決してできない。クォークどうしを引き離すためには無限のエネルギーが必要なようだ。だから，クォークは閉じ込められていて，決して外に出てこない。

量子数にはほかにも何種類かあるが，次に説明するのは電子数である。

2.5 電子ニュートリノ，電子数とクロッシング

これまでの内容を整理しておこう。まず，クォークにはアップとダウンとがあり，それぞれ3色ある。電子とニュートリノも出てきた。それぞれの粒子に対応する反粒子もあった。後でほかの種類のニュートリノが出てくるので，中性子崩壊で生ずるニュートリノを反電子ニュートリノとよぶことにしよう。この名前は，このニュートリノが電子と一緒に放出されるという一般的な規則に由来している。中性子崩壊では，電子数とよばれる量子数を考慮する必要がある。電子と電子ニュートリノの電子数は+1で，それぞれの反粒子の電子数は−1だ。ほかの粒子の電子数はすべて0だ。中性子は，陽子1個と電子1個，それから反電子ニュートリノ1個に崩壊する(だが，陽子1個と電子1個と電子ニュートリノ1個にはならない)。この崩壊では，始状態でも終状態でも電子数は0である。

電子数の重要性を理解するために，もうひとつの実験事実を紹介しておこう。中性子は，陽子1個と電子1個と反ニュートリノに崩壊する。この現象と密接に関係するのが，ニュートリノと中性子が衝突する衝突型反応である。衝突後に中性子は消失し，陽子1個と電子1個が残る。このような反応は実際に(ニュートリノ実験で)観測されている。ここに出てくるニュートリノは，どれも電子型である。



2つめの反応は衝突だが，この反応は，理論的には，始めの反応(中性子崩壊)から反ニュートリノを取り去って，入射ニュートリノに置き換えることで起こる。この手続き，つまり終状態から反粒子を取り出して，入射状態の粒子に換える(あるいはその逆の)操作をクロッシングという。終状態から粒子を1個取り去って，初期状態における反粒子と置き換える(あるいはその逆)手続きは，クロッシングの定義に含まれる。つまりクロッシングによって，ある過程から別の過程へ移行することができる。

ただしクロッシングによって得られる反応には，エネルギー保存則によって禁止されるものもあるので注意しないといけない。例えば，中性子崩壊から中性子と陽子両方のクロッシングによって得られる反応は，エネルギー保存則からいえば，起こることができない。

反陽子 ⟶ 反中性子 ＋ 電子 ＋ 反電子ニュートリノ

なぜなら反陽子は反中性子よりも軽いからである(ただし陽子と反陽子，中性子と反中性子の質量はそれぞれと等しい)。だから，この反応は実際には起こらないだろう。

図に示した衝突型反応では，電子数が保存されている。始めに電子数1のニュートリノがあり，最後には電子数1の電子があるからだ。中性子と陽子の電子数は0である。このように，量子数の考え方とクロッシングは実にうまくかみ合っている。ここで大切なのは，反粒子は粒子と逆符号の量子数をもっており，クロッシングは粒子から反粒子(あるいはその逆)への置き換えを意味している点である。

このようなニュートリノ反応とよく似た実験が，原子炉の近くでも行われている。原子炉では膨大な量の反電子ニュートリノが生まれる。反電子ニュートリノと陽子1個が衝突すると，中性子1個と陽電子(反電子)1個が生じる。

反ニュートリノ ＋ 陽子 ⟶ 中性子 ＋ 陽電子



マレー・ゲルマン(Murray Gell-Mann, 1929)　1960 年代における素粒子論の立役者はゲルマンにちがいない。系統的な方法で，たくさんの粒子に関する膨大な実験データを次第に解きほぐしたゲルマンは，それらの粒子がクォークの束縛状態であることを明らかにした(1969 年ノーベル賞受賞)。1964 年，彼はクォークという概念を導入した(ゲルマンとは独立に，ジョージ・ツヴァイク [George Zweig] も同じことを考えついた)が，ほかの人と同様，はじめのうちは，実在する粒子と考えてはいなかった。どのような実験でも，クォークが単体で観測されたことはなかったからだ。だが，1969 年に状況が大きく変化した。理論家のジェームス・ブョルケンの研究に触発されたスラック(SLAC)での実験結果が出現したのだ。

ゲルマンは，あまり計算が得意ではなかった。おそらく，カビボの提案したクォークの混合(第 3 章参照)を見落としたのはそのためだろう。正確には，基本的な考え方は知っていたが，最後までは追究しなかったというべきかもしれない(カビボ以前に出したレヴィ [Levy] との共著論文の脚注でふれている)。ゲルマンが，カビボ角のことをよく「奇妙な角度」と呼んでいたため，とある会議において，カビボは「奇妙なカビボ」という名札をつけていた。さらに遡る 1963 年，ブルックヘブン会議で上記の考えについて話した際，ゲルマンは講演の内容を報告集に載せる代わりにシューベルトの未完成交響曲の 1 ページを送った(そして実際に出版した)。

ゲルマンは熱心な野鳥観察家である。野鳥観察という趣味(趣味とよべるなら)に大切なことは，データ収集と報告をとても正直に行うことだ。以前，オーストラリア旅行中に，アデレード付近で大きな鳥小屋に入ってしまったことがあるそうだ。閉じこめられた鳥を見たくない彼は，うつむいて目を覆うと急いで通り抜けてしまったという。

この反応では，電荷(始めと終わりで＋1)と電子数(始めと終わりで−1)が保存されている。サバンナリバーの原子炉近くで，コーワン(Cowan)とライネス(Reines)が1956年に初めて(反)ニュートリノを検出したときに用いたのが，この反応である(コーワンが1974年に死亡したため，ライネス1人が1995年にノーベル賞を受賞した)。この発見以前には，ニュートリノは中性子崩壊におけるエネルギー欠損(中性子の質量と，当時発見済みだった陽子と電子の合計質量との差)を説明するための仮説的な存在でしかなかった。だが今や，ニュートリノが実在することは確かめられている。またデービス(Davis)が実際にニュートリノではなく反ニュートリノであることを示した。

コーワン-ライネスの反応は，中性子崩壊と直接クロッシングで関係するわけではなく，むしろ反中性子の崩壊と結びついている。ここで，すべての反応に一般的な規則が登場する。すべての粒子を反粒子で置き換えれば，もう一つの可能な反応を得ることができる(共役反応という)という規則である。つまり，中性子崩壊に対応して反中性子崩壊が起こることになる。

$$\text{反中性子} \longrightarrow \text{反陽子} + \text{陽電子} + \text{電子ニュートリノ}$$

反中性子，反陽子および電子ニュートリノをクロッシングすれば，コーワンとライネスが観測した反応になる。

ある反応と，その共役な反応の性質は非常によく似ている。例えば反中性子の平均寿命は中性子と同じである。

2.6　第1世代

今まで述べてきた(グルーオンと光子以外の)粒子を49ページの図に示す。どれも我々を取り囲む世界に存在するものばかりだ。これらの粒子を「第1世代」とよんで，後に出てくる他世代の粒子と区別することにする。

これらの粒子間には何種類かの力がはたらく。もっともよく知られている力は電磁相互作用だろう。光子はこの電磁相互作用に関係している。光子の質量は0，電荷も0だ。光子は電荷をもつすべての粒子と相互作用し，その強さは電荷の大きさに比例する。つまり，光子はダウンクォーク(電荷$-\frac{1}{3}$)よりもアップクォーク(電荷$+\frac{2}{3}$)とより強く相互作用する。電荷が0のニュートリノ



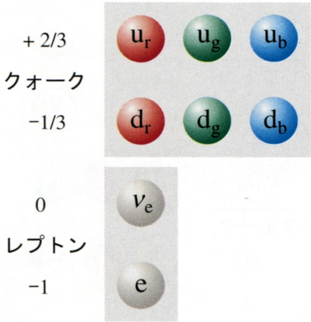
ヴォルフガンク・パウリ(Wolfgang Pauli, 1900-1958)　1930 年にニュートリノという考えを導入したのがパウリだ。だが，実際にニュートリノの存在が実験的に証明されたのは，1956 年のことである。

パウリは量子力学や場の量子論に多大な貢献をした。なかでも有名なのは，スピンが $\frac{1}{2}$ の粒子は同じ状態に 2 個以上入ることはできないという排他原理である。原子の中で，すべての電子がエネルギー最低の軌道に落ち込まない理由が，この排他原理である。パウリは，この発見によって 1945 年にノーベル賞を授与された。

アインシュタインが後継者とみなしていたのがパウリだった。パウリは自分の説を人に押しつけたりはしなかったが，一方で，同世代の研究者を痛烈に批判することが多かった。例えば，強い力を媒介する粒子を思いついたシュテュッケルベルクの意気をくじいたのは彼だ(この粒子はパイ中間子とよばれている。パイ中間子を予言した功績で 1949 年にノーベル賞を受賞したのが湯川である)。パウリは，自分の考えにも同様に批判的だった。彼が考え出した方程式で，ヤン-ミルズ理論として知られているものがある。この方程式は現在の標準モデルの基礎となっている。1954 年，この理論に関するヤンの講演を聴いたとき，パウリはこの理論の問題点について質問し続けた。それらの問題点がヒッグス粒子の導入によって解決されるのは後の話である。この話から得られる教訓は，すべての問題を一度に解こうとしてはいけないということ，そして簡単にあきらめてはいけないということだ。

第 2 次世界大戦の間，パウリはプリンストンの研究所にいた。原子爆弾製造計画に参加しなかった希有な人物でもある。

彼にまつわる逸話は多数ある。私が気に入っているのは，ある講演を聞いた後に言ったこの言葉，「間違ってすらいない(It is not even wrong)」だ。



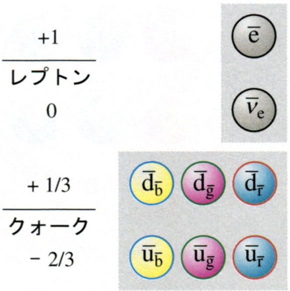
や光子とは結合しない。光線が 2 本交わっても散乱は起きない。電荷をもつ粒子は，すべて光子を放出あるいは吸収することができるが，その前後で粒子の種類は変わらない。例えば，電子は電子と光子になる。この反応を図示しよう。



第 1 世代の電荷をもつ粒子とこの図を重ねることで，実際に起きる反応が表せる。この図では時間の順序は区別していない。電子が光子を放出したり，吸収したりできるということは，光子が出てゆくこともあるし，入ってくることもあるということだ。

あえて付け加えるとすれば，量子効果がもともと存在しなかった相互作用を生み出すことがある，という点だろう。そのために，非常に弱い光子–光子散乱などがおきる。この点は，ある程度素粒子理論を理解していなければむずかしい。

粒子にはそれぞれ対応する反粒子がある。反粒子も，同じような図に示すことができる。反クォークは反色(例えば，青の反色は白引く青，つまり赤と緑の混合色である黄色になる)をもっている。色という考え方は説明に都合がよいが，この比喩が使えるのは単に幸運な偶然だということを忘れないでほしい。クォーク世界の色概念は，可視光の色とは無関係である。



反粒子の図は，上下・左右を反転して描いてある。反粒子もすべて光子を放出したり，吸収したりすることができる。もちろん，電気的に中性な粒子は別である。先ほど示した粒子と光子の相互作用を示す図は，反粒子でも変わらない。

図中の影のつけ方や反粒子の表し方には，ほかにもいくつかの相互作用が関係している(後で説明する)。代表的なのは中性子崩壊を引き起こす弱い相互作用である。中性子崩壊は，ダウンクォークがアップクォーク(と電子と反ニュートリノ)に崩壊することによって起こる。この過程を，ダウンクォークからアップクォークへ向かう矢印で示そう。同様に同じ矢印を使って，反アップクォークから反ダウンクォーク(と電子と反ニュートリノ)への崩壊も表せる。そのために，反粒子族は上下さかさまに描いた。反アップクォークは反ダウンクォークよりも軽い(それぞれアップクォークおよびダウンクォークと等しい質量をもつ)ので，実際には反アップクォークから反ダウンクォークへの崩壊は起こらない。だが，クロッシングした反応なら可能である。実際，クロッシングによって 2 番目の反応は，1 番目の反応となる。反粒子の図は，粒子の図をクロッシングしたものということができる。

この点が納得できたら，次節に進んでほしい。次節では，我々の周りの物質中には存在しない粒子を紹介する。これらの新しい粒子は不安定なので，我々の周りには存在しない。だが，加速器を使ってつくりだすことはできる。実は，新粒子の発見は加速器によって現実となったのである。

2.7 世代と力

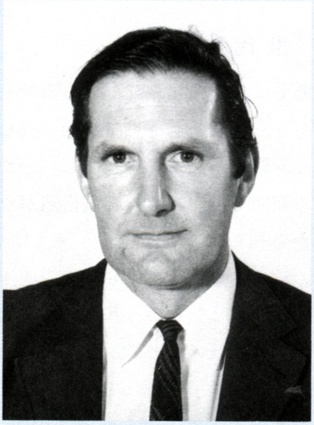
この節では，現在知られている素粒子を紹介しよう。素粒子にはさまざまな種類があり，なんとも不思議な繰り返しが存在する。ここでは現象論に徹して，どんな素粒子があるかを説明し，それらの性質について述べよう。現在知られている範囲では，素粒子には構造がない。だから「素」粒子とよぶのである。早くから知られていた粒子，例えばパイ中間子やK中間子は束縛状態だ。これらの粒子については第8章で説明する。

素粒子はスピンという基本的な性質によって分類されている。粒子のスピンとは内部の回転のことで，テニスボールやビリヤードの球の自転のようなものだ。スピンは量子化されており，粒子は一定の大きさのスピンをもつ。スピンの大きさは基本単位の$\frac{1}{2}$の(0を含む)整数倍になっている。基本単位の大きさは，現時点は重要ではない。同じ粒子の回転がときによって変わるわけではなく，回転軸の向きが変わるだけである。つまり同じ粒子はいつも同じように自転しており，決して変わることはない。これは粒子に固有の性質であり，その粒子のスピンとよばれる。回転がかかったテニスボールやビリヤードの球が衝突すると複雑な動きをするのと同じように，スピンは粒子の散乱に影響するので，粒子が衝突するときの振る舞いを調べることで粒子のスピンがわかる。

普通の物質を構成している粒子のスピンはすべて$\frac{1}{2}$だ。つまり，電子やクォーク(クォークは陽子や中性子，したがって原子核をつくっている)のスピンはすべて$\frac{1}{2}$である。電磁気力，弱い力や強い力などの力を媒介する粒子のスピンは1だ。例外は重力を媒介する重力子でスピン2をもっている。この世界を構成する紛れもない事実である。

不可解な謎がある。スピンが0の素粒子がこれまでに見つかっていないことだ。ヒッグスボソンとよばれるスピン0の粒子が存在するはずだと考えられているのだが，いまだに発見されていない。この粒子の役割は，理論的に非常に重要である。本書のひとつの目的は，なぜヒッグスボソンがあると考えられているのか，なぜこの粒子を見つけるための大がかりな実験が計画されているのかを説明することにある。

どんな粒子にも対応する反粒子がある。粒子とその反粒子を組み合わせると，エネルギー以外には，電荷もスピンも量子数ももたない状態がつくりだせる。

セシル・パウエル(Cecil Powell, 1903-1969)と**ドナルド・パーキンス**(Donald Perkins, 1925)。パウエル，パーキンスとその仲間達は，宇宙線を研究するための写真技術を開発した。宇宙線は(例えば陽子のような)粒子で，周りの宇宙から降ってくる。そして大気中の原子核と衝突して，さまざまな粒子を生み出す。パウエルたちの写真技術を使えば，その様子が詳しく研究できる。特に衝突によって生み出される粒子が，この方法で明らかになった。1947 年，インペリアル・カレッジにいたパーキンスは，ある粒子(パイ中間子)と原子核が反応したイベント(事象)を見つけた。それまでに見つかっていたミューオンは，原子核とは強く反応しない。パーキンスはパイ中間子を発見したのだ。しばらくして，ブリストルのオッキャリーニとパウエルが，パイ中間子がミューオンとほかの何か(ニュートリノ)へと崩壊するイベントを 2 つ見つけた。続いてパーキンスが発見したイベントも同じようなものだった。これらの事実から考えて，2 種類の異なる粒子があることは明らかだった。そして片方は他方よりも軽いはずだ。そうでなければ，崩壊できるはずがない。それぞれの粒子の質量は，約 135 MeV (パイ中間子)と約 100 MeV (ミューオン)だった。クォークの束縛状態であるパイ中間子は，原子核中の陽子や中性子と強く相互作用するが，ミューオンはちがう。パウエルは，1950 年にノーベル賞を受賞した。写真乳剤に関してマリエッタ・ブラウという女性も大きな貢献をしたので，共同受賞者に加えるべきだと信じる人もいる。パーキンスは 2001 年に，ニュートリノ実験に関する(後期の)研究に対してヨーロッパ物理学会の高エネルギー素粒子物理学賞を受賞した。彼は陽子や中性子によるニュートリノ散乱について調べたが，特に中性カレントとよばれるものを測定したことで名高い。また，クォークでできていることの証拠を示す全断面積[†]を測定したのも彼である。

---

† (訳者注)粒子を衝突させた時のぶつかりやすさを表わす量を断面積という。断面積が大きいほどぶつかりやすい。



ジュゼッペ・(ベッポ)・オッキャリーニ(Guiseppe (Beppo) Occhialini, 1907-1993 左側)と**パトリック・ブラケット**(Patrick Blackett, 1897-1974)。1920年代のイタリアにおける宇宙線研究の発展はめざましかった。その産物として開発されたのが同期トリガーである。それらの技術に詳しかったオッキャリーニはイギリスに渡り，ブラケットとともにトリガー付のウィルソン霧箱(荷電粒子が通過するときにだけ写真を撮ることができる)を開発した。そして，アンダーソンとほぼ同時期に陽電子発見にいたった。1948年，ブラケットはトリガー付のウィルソン霧箱に関する功績によってノーベル賞を受賞している。

1946年には，コンヴェルシ(Conversi)，ピッチオーニ(Piccioni)とパンチーニ(Pancini)が，宇宙線中のミューオンを発見した。当時，湯川が理論的に予言していたパイ中間子は，原子核と強く相互作用するはずだった。だが，コンヴェルシ達が宇宙線の中から見つけた粒子は原子核と強く相互作用することはなく，パイ中間子ではないことがわかった。

イタリアのファシズム体制から逃れてブラジルにいたオッキャリーニは，戦後はイギリスに戻り，パウエルの写真乾板グループに加わった。

オッキャリーニはわかりやすく話す人ではない。ブラケットやパウエルとのノーベル賞共同受賞が実現しなかった理由は，そのあたりにありそうだ。実際，彼も受賞者に加えるべきだったと考える人は多い。だがオッキャリーニは1979年に栄誉あるウォルフ賞を受賞している。ブラケットがパウエル以上にオッキャリーニに感謝していることにも言及しておこう。ブラケットとパウエルのノーベル賞講演がその証拠である。

オッキャリーニは宇宙観測にも重要な貢献をした。ガンマ線バースト発見に大きな役割を果たした人工衛星は，彼にちなんでベッポサックスと名づけられた。

そのようなものを反粒子と定義することもできる。例えば陽電子は電子の反粒子だが，電子と反対符号の電荷をもつ。また，陽電子は電子と逆のスピンをもつといってもよい。陽電子のスピンと電子のスピンの向きが逆のときには，両者を合成した全スピンを0にできるからである。しかし，粒子のスピンの向きを逆にするには，上下を逆さまにして粒子を眺めればよいので，普通はスピンの向きを粒子を特徴づける量だとは考えない。ともかく，スピンの大きさは等しくなければならない。普通，粒子のスピンというと，スピンの大きさという意味である。つまり，陽電子のスピンは，電子と同じ大きさなので，スピンの向きを逆にして電子と陽電子を組み合わせると，全体のスピンが0になる。

陽子(スピン$\frac{1}{2}$)の反粒子は，反陽子(これもスピン$\frac{1}{2}$)で，電荷 -1 とバリオン数 -1 をもつ。反粒子が粒子と逆符号の量子数をもつという要請は，新しい量子数を導入するときの強い制限となる。例えば

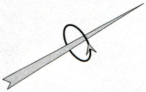
$$\text{陽子} + \text{反陽子} \longrightarrow \text{電子} + \text{陽電子}$$

という反応も可能(実際そうだが)でなければならない。始状態と終状態どちらも，バリオン数と電子数が0になっている。

前にもふれたが，素粒子だけが反粒子をもつわけではない。陽子やその反粒子などの素粒子ではない粒子にも，対応する反粒子がある。いくつか粒子が組み合わさった束縛状態の反粒子は，それぞれの構成粒子の反粒子からできている。

さらに反粒子の質量は，対応する粒子の質量と厳密に等しい。例えば陽電子の質量は電子の質量と等しい。理論的には，反粒子の存在は，量子力学とアインシュタインの相対性理論の帰結として導くことができる。これはCPT定理という名前で知られている。実験でも，粒子と反粒子の質量を比べることにより，非常に高い精度でこの定理が成り立つことがわかっている。

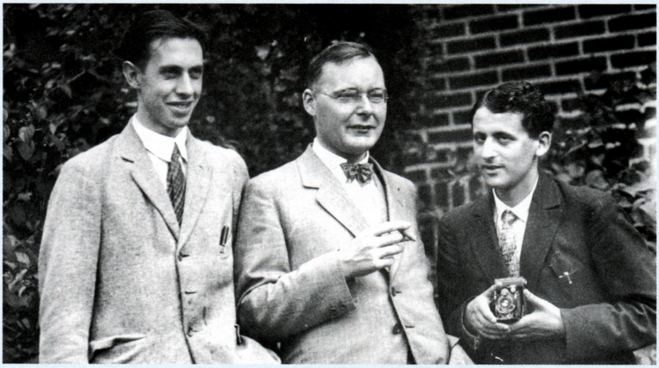
粒子と対応する反粒子が一致することもある。そのためにはその粒子は電気的に中性でなければならない。粒子が電荷をもつなら，反粒子は逆符号の電荷をもつので，粒子と反粒子が一致することは不可能だからである。実際，スピン以外の量子数はすべて0になる。このような関係を自己共役とよぶ。例えば光子は自己共役な粒子である。中性のパイ中間子 π^0 も自己共役な粒子だ。この場合は，クォークと反クォークのスピンをもたない束縛状態である。



もう一点，大切なことにふれておこう。粒子のスピンは，進行方向を向いていることもあれば，逆向きの場合もある。上の図はその様子を示している。図中のスピンは反時計回りの方向で，左巻きの粒子とよばれている。しかしこれらの方向は相対的なものにすぎない。もし，読者が粒子と同じ方向に粒子より速く走ったら，粒子が逆向きに走るように見えるだろう。つまり，左巻きの粒子があれば，必ず右巻きの粒子も存在することになる。なぜなら一定の速さで走る2人の観測者にとって，物理は同じでなければならないからだ。ある観測者にとって何かが存在するなら，その観測者に対して一定の速度で走るすべての観測者にとっても，同じものが存在しなければならない。この点は，少し抽象的だが重要である。第2の観測者が右巻きのニュートリノを観測したならば，第1の観測者も適切な状況のもとでは，右巻きのニュートリノを観測できることになる。これが相対性理論の真髄である。

しかしながら，上の議論は質量0の粒子が光速で走っている場合には成り立たない。相対性理論によると，観測者がどんなに速く走っても，光速で走る粒子はいつも同じ方向に光速で走る。つまり質量をもたない粒子に対しては，スピンの向きは相対的なものではない。だから，いつでも左巻きという粒子が存在することになる。もしニュートリノの質量が厳密に0ならば，ニュートリノはこの種の粒子である。だから相互作用の結果，いつも左巻きの粒子が出てくることになる。その粒子は，進行方向に対しいつも反時計回りに自転している，つまり図のようにいつも左巻きだ。反ニュートリノの場合はいつも右巻きになる。粒子と反粒子を入れ替えると，スピンの向きはひっくり返る。

おもしろいことに，ニュートリノと反対向きに走る反ニュートリノが衝突すると，スピンの向きが同じになる。そして双方のスピンが足し合わさって，スピン1となる。逆に考えれば，ある粒子が(逆向きに飛んでいく)ニュートリノと反ニュートリノの対に崩壊した場合には，すぐに，この粒子のスピンは1だとわかるだろう。実際にこんなスピン1の粒子が存在し，Z^0 とよばれている。この粒子は，ときどきニュートリノと反ニュートリノの対に崩壊する。



ジョージ・ウーレンベック(George Uhlenbeck, 1900–1988), **ヘンドリック・クラマース**(Hendrik Kramers, 1894–1952)と**サムエル・ハウトスミット**(Samuel Goudsmit, 1902–1978)。ウーレンベックとハウトスミットは，電子のスピンを理論的に予測したことで名高い。彼らはライデン大学の学生だった頃にこの研究を行った。当時，スピンの値が$\frac{1}{2}$というのは予想外だった。量子力学でなければありえない。ローレンツとフェルミが非常に強硬に反対したのはそのためである。しかし，ライデン大学で彼らの指導教授だったエーレンフェストやボーアは，論文を発表するように強く勧めた。

1927年，ウーレンベックとハウトスミットはアナーバーにあるミシガン大学の物理学教室の一員となり，有名なアナーバー夏のシンポジウムの成功に一役買った。

彼らはいつもお互いにいたわり合っていた。彼らがノーベル賞を受賞するべきだったと考える人も多いが，残念なことに1979年にウーレンベックがウォルフ賞を受賞しただけである。偶然知ったことだが，ウーレンベックは受け取った賞金の半分をハウトスミットの未亡人に贈っている。

ハウトスミットは，アルゾス調査団を率いて，第2次世界大戦中にドイツ人，特にハイゼンベルクが原爆の開発にどのように関わったのかを調べた。またドイツのハイガーロッホにあった原子炉を破壊した。

クラマースは量子力学に大きく貢献した。なかでも重要なのはくりこみの考え方で，この考え方に従えば水素原子のエネルギー準位のわずかなズレを計算できる。実際にこのズレ(ラムシフト)が観測されたとき，ファインマン(Feynman)やシュウィンガー(Schwinger)をはじめとする多くの人々[†]が，クラマースの考えを取り入れて，量子電磁気学をつくりあげた。だが名声が広まったのは，彼の死後のことである。

---

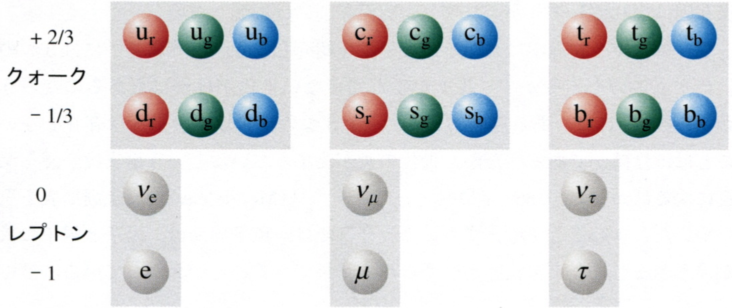
† (訳者注)彼らとは独立に，日本でも朝永振一郎をはじめとするグループがくりこみ理論をつくりあげた。

これまで記述してきた事柄は，ニュートリノが質量をもつ場合には成り立たない。そのような場合，もはやニュートリノは光速では走らないので，読者がニュートリノより速く走ることができるなら，左巻きのニュートリノを右巻きに変えることができる。つまり，ニュートリノが質量をもてば，左巻きと右巻きの両方のニュートリノが存在可能になる。

2.8 スピン $\frac{1}{2}$ の粒子

スピン $\frac{1}{2}$ の素粒子には，クォークとレプトンの２種類がある。素粒子の名称は発見の歴史に由来しているので，今から見ると妥当でないものもある。例えば，ギリシア語の小さいという単語に由来するレプトンは，電子やミューオン，および対応するニュートリノの質量が軽かったので，このように名づけられた。レプトンよりも重い陽子や中性子は，同じくギリシア語で強いという単語からとったハドロンという名でよばれた。その後，研究が進むにつれて陽子や中性子を構成するアップクォークやダウンクォークは，比較的軽いことがわかってきた。ほかの例をあげよう。タウ(τ)レプトンの質量は陽子の２倍ほどあり，もはや軽いとはいいがたい。それでもタウ(τ)と対応するタウニュートリノは，変わらずレプトンとよばれている。先にも述べたように，クォークの束縛状態はハドロンとよばれる。

クォークとレプトンを，性質に従って並べると下図のようになる。



左に書いてある数字は電荷だ。単位は電子の電荷の符号を変えたものである。同じ行にある粒子の電荷は等しい。素粒子には3つの世代または家族がある。1世代(または1家族)は6種のクォークと2種のレプトンからなる。3つの世代の性質は質量以外はまったく同じである。例えば，トップクォークには，トップ赤，トップ青，トップ緑の3種類があり，すべて質量が等しく，$+\frac{2}{3}$の電荷をもつ。アップクォークも同じように3色あり，電荷はすべて$+\frac{2}{3}$であるため，両者はそっくりだと思うかもしれない。だが，トップクォークの質量はアップクォークの実に35000倍もある。当惑するかもしれないが，本当の話である。すべてのクォークにはバリオン数と，先ほど出てきた色電荷がある。それぞれのクォークは1単位の色電荷をもつ。例えば赤クォークなら，赤の色電荷1単位をもっている。さらに，色電荷にも正負がある。負の赤なら，反赤とよぶ。レプトンには色電荷がないが，レプトン数という独自の保存される量子数がある。ここにあげたレプトンはすべて，レプトン数が1である。反レプトンのレプトン数は−1である。ほかの粒子のレプトン数は0である。さらにそれぞれのレプトン対には，それぞれ決まった量子数がある。つまり，電子数(電子と電子ニュートリノの電子数は1，その反粒子は−1，その他の粒子は0)のほかにも，ミューオンとミューニュートリノに対してはミューオン数，タウ粒子とタウニュートリノに対してはタウ数があるということだ。電子数とミューオン数，そしてタウ数が保存されるからこそ，レプトン数が保存されるという流れは明らかだろう。ニュートリノが質量をもつ場合には，話が変わる。その場合には，おそらく個々のレプトン数(電子数，あるいはミューオン数など)の保存則は崩れてしまうが，レプトン数保存則には影響しない†。

現在の素粒子物理学における最大の謎を紹介しよう。なぜ素粒子には3つの世代があるのだろうか？　我々がまだ知らない世代がほかにもあるのだろうか？　後の問には，ある程度答えられる。3つの世代以外の世代は存在しないことはほぼ確かである。だが，世代の数が決まっているという事実は，謎を深遠にするばかりだ。1869年に，メンデレーエフ(Mendeléev)が原子周期表を思いついたときのことを考えてみよう。今日では，原子周期は，陽子と電子の数が違うさまざまな束縛状態がつくられる結果であることがわかっている。では，

---

† (訳者注)ニュートリノがマヨラナ質量というものをもつならば，レプトン数保存則も壊れる。

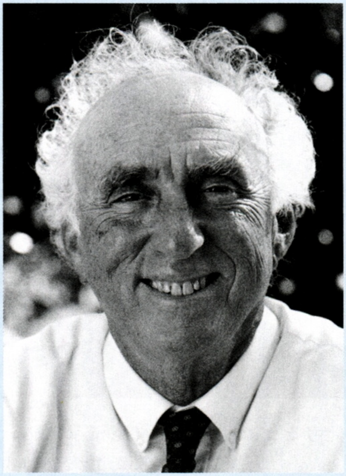
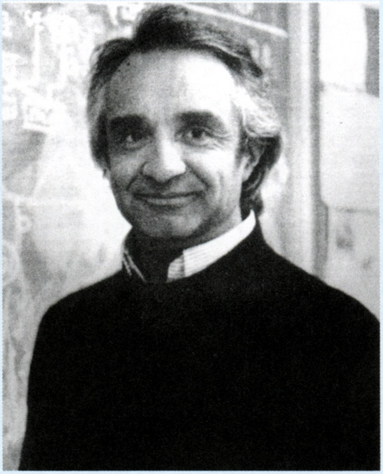
バートン・リヒター(Burton Richter, 1931)と**サミュエル・ティン**(Samuel Ting, 1936)は，1974年にチャームクォークを発見した。といっても，実際に発見したのはチャームクォークではなく，チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態だった。この粒子が本当に新しいクォークからできていることが証明されるまでには，数年かかった。リヒターとティンは，1976年のノーベル賞を共同受賞した。

リヒター(と彼のグループ)はスラック(サンフランシスコ近郊にあるスタンフォード線形加速器センター)で，電子-陽電子衝突を用いて実験していた。ティン(と彼のグループ)はビーエヌエル(ロングアイランドにあるブルックヘブン国立研究所)で陽子衝突の実験を行っていた。発見したチャームクォークの束縛状態を，リヒターとティンらがそれぞれ ψ，J と名づけたので，現在では J/ψ とよばれている。

J/ψ の発見は，理論物理学が待ち望んでいたものだった。理論的にチャームクォークの存在が予言されていたとはいえ，チャームと反チャーム粒子の束縛状態に，実験結果が示すような性質があるとは誰も予測していなかった。J/ψ は不安定だったけれど，その寿命は予想以上に長かった。しかし，発見されたものがチャーム反チャーム束縛状態だという事実が確立し，寿命が長くなるメカニズムが明らかになるまでには，しばらく時間が必要だった。宣伝に長けたスラックの人々は，この発見を「大きく舵が切られた11月革命」と称した。実際には，数年前に舵は切られていたのだが。

セルンでは交差型蓄積リングで J/ψ がたくさんつくられていたにもかかわらず，J/ψ を発見することができなかった。J/ψ 発見のニュースが，セルンにおいて嵐のような議論を巻き起こしたことは，容易に理解できるだろう。本書の執筆に際して，責任が誰にあるのか調べようとはしたのだが，関係者の人々は，互いの責任を指摘しあうばかりでどうにもならなかった。知恵は往々にして事が起こった後に生まれる。

フラスカティにおける悲劇については，第7章で述べよう。

マーティン・パール(Martin Perl, 1927)(左側, 1995 年ノーベル賞受賞)は, 1975 年にタウ粒子発見という栄誉を手にした。タウ粒子はミューオンや電子によく似ているが, かなり重い。例えばミューオンは崩壊して電子 1 個とニュートリノ 2 個になることがある。同様に, タウはミューオン 1 個とニュートリノ 2 個になる。相互作用の強さは, 実験の精度内では等しい。

タウ粒子の発見から, 私は素粒子に第 3 世代が存在することを確信した。だがすでに, 大きく後れをとっていた。1973 年の時点で, 小林と益川の 2 人が第 3 世代の存在を主張していたのだ。クォーク混合(第 3 章で述べる)に基づく彼らの議論は, 大変に論理的なものだったが, 当時すんなりと受け入れられたわけではない。

イタリアの物理学者**アントニーノ・ズィキキ**(Antonino Zichichi, 1929)は, ある意味では, パールの先駆者だった。ズィキキは, 陽子-反陽子衝突やフラスカティの電子-陽電子衝突を用いて, 新しいタイプのレプトンを長年探していた。スタンフォードにいたパールは, スラック研究所の高エネルギーの電子-陽電子衝突によって研究を有利に進めることができたのである。

ズィキキは, シシリーのエリーチェに, 科学文化センターを設立した。現在も高エネルギー物理学に関する夏の学校が毎年行われる大変に重要な施設である。

パールはタウ粒子を大量につくりだす装置建設を目指していた。だがスラックはB-ファクトリー, つまりボトムクォークを含む粒子を大量につくりだすための装置を建設した。現在から見ると, この選択は正しかったといってよい。

同じように，クォークやレプトンが何かの束縛状態であると考えたらどうだろうか。しかし，そうもいかない。普通に考えれば，束縛状態は無限に存在しうる。つまり新しい原子核をつくるには，次々に陽子と中性子を付け足していけばよいだけのはずだ。最終的には不安定になるかもしれないが，それは別の問題である。だが，素粒子の世代が3種類以上ないという事実は，素粒子を何かの束縛状態と考えるのが不可能であることを意味している。さらに問題をややこしくするのは，ニュートリノが3種類あることだ。ご存知のとおり，ニュートリノ質量は0，もしくは限りなく0に近い。やっかいなことに，質量が0の束縛状態をつくるにはどうしたらよいかは未解明なままだ。どうして3つの世代があるのか誰にもわからない。歯がゆい話である。

それぞれの素粒子の名前と質量を図に示した。質量の単位はMeVかGeV (1 GeV＝1000 MeV)，細かいことは単位についての説明箇所を確認してほしい。

ただし，すべての粒子質量が正確にわかっているわけではない。電子の質量はもちろん精密に測定されており，0.510 998 902 MeVである。末尾2桁の誤差は±21である。日常的な単位，kgに直したかったら，0.910 938 97を10^{30}で割ればよい。クォークの質量は特に軽いものについては，正確にはわからない。ニュートリノ質量は上限値を示している。これまで，ニュートリノには質量がないと考えられていたが，近年，いくつかの実験的事実から少量ながら質量をもつことが示唆されている。もちろん，それらの値は図中の上限値よりも小さい。

電子は安定である。我々が知っているかぎりではニュートリノも安定である。ミューオンとタウの寿命(半減期ではない)は，それぞれ$2.197\times10^{-6}\approx2$マイ

クォーク	+2/3	アップ 1.5-4.5 MeV	チャーム 1-1.4 GeV	トップ 174-182 GeV
	−1/3	ダウン 5-8.5 MeV	ストレンジ 80-155 MeV	ボトム 4-4.5 GeV
レプトン	0	電子ニュートリノ < 0.000 003 MeV	ミューニュートリノ < 0.19 MeV	タウニュートリノ < 18.2 MeV
	−1	電子 0.511 MeV	ミューオン 105.66 GeV	タウ粒子 1777 MeV

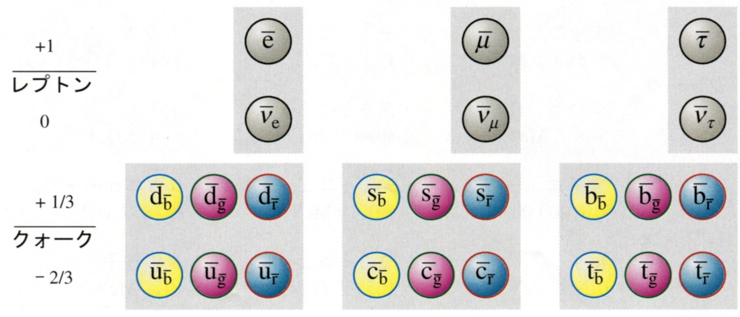
クロ秒，2.9×10^{-13}秒である。

もうひとつ大事なことがある。同じ網掛け部分内の上下に並んだ粒子対は，互いに関係している。例えばアップクォークとダウンクォークは，弱い相互作用で結びついている。同じ網掛け部分内に入っていない粒子は，弱い相互作用では結ばれない。つまり，今回は電子とそのニュートリノを，アップクォークやダウンクォークと同じ世代に入れたが，必ずしもそうしなければならないわけではない。素粒子の世代に関する理解が深まれば，ミューオンとそのニュートリノが，アップクォークやダウンクォークと同じ世代に入る日が来るかもしれない。現時点で図に示したような世代を想定しているのは，単に質量に注目しているからだ。つまりもっとも軽いレプトンを，もっとも軽いクォークに対応させているだけである。

素粒子物理学はほかにも大きな問題に直面している。素粒子の質量はどこからくるのだろうか？　トップクォークはなぜこんなに重いのだろう？　そしてニュートリノは(もしそうならば)なぜ質量をもたないのだろう？

1975年以来，さまざまな深い考察や高度な数学が脚光を浴びてきた。だが，残念ながら3世代問題や，後で述べるほかの問題に対してはまったく役立ちはしなかった。しかし，先走るのはやめておこう。理解できたことや実験的に確かめられたこともたくさんあるのだ。

これまで紹介してきた粒子には，それぞれ対応する反粒子がある。反粒子にも3世代あり，図にあるように粒子と同じ質量で，反対の量子数をもっている。ニュートリノは中性だが，反ニュートリノはニュートリノとは異なる。これま



で説明したように，スピンの向きが違うのである。さらにニュートリノのレプトン数は1だが，反ニュートリノのレプトン数は−1である。つまりニュートリノで起こりうる反応が反ニュートリノでは起こらない。もちろん逆も成り立つ。反粒子は，普通，粒子の上に線を引いて表す。色の場合も同じだ。だから反(赤ダウンクォーク)の色は，反赤だ。この粒子は赤ダウンクォークと合わせると中性色になる。したがってクォークが18種類，反クォークも18種類，レプトンと反レプトンがそれぞれ6種類で，合計48種類の粒子がある。

2.9 スピン1とスピン2の粒子

現在知られているスピン1とスピン2の粒子を紹介しよう。まずスピン1の粒子である。

名前	記号	電荷	質量
ベクトルボソン	W^-	−1	80.42 GeV
ベクトルボソン	W^+	+1	80.43 GeV
ベクトルボソン	Z^0	0	91.188 GeV
光子	γ	0	0
グルーオン(8)	$g_{a\bar{b}}$	0	0

1 GeVは1000 MeVである。参考ながら，電子質量は約0.5 MeV，陽子質量は約1 GeVである。ベクトルボソンは大変重い。陽子の100倍ほどもある。グルーオンについているaとbは，それぞれが赤か緑か青かを表している。bの上に線が引いてあるのを見落とさないでほしい。この線は，反色つまり反赤，反緑，反青のどれかを表す目印である。グルーオンには，3×3で9種類あるように思うかもしれないが，存在しないグルーオンがある。色を足し合わせるとゼロ(白)になる「白い」グルーオンだ。そんな粒子が存在しないことは明らかである。だからグルーオンは全部で8種類ある。

W^+とW^-は，お互いに相手の反粒子である。光子とZ^0の反粒子は自分自身である。グルーオンの反粒子も，やはりグルーオンである。

唯一わかっているスピン2の粒子は，重力子(質量0)である。重力場における重力子の役割は，電磁場における光子の役割と同じである。重力場についてはよくわかっているが，実は重力子が直接観察されたことはない。重力子の反

粒子は自分自身である。

重力子を含めると，粒子は全部で 48＋13＝61 個もある。多すぎる。またまた世界が複雑になってきた。

2.10　力と相互作用

我々がマクロな世界の日常生活において経験する力には2種類ある。電磁気力と重力である。なぜ，この2種類しか直接に経験できないのだろうか。この2種類だけが，遠くまで届く力だからである。遠くといっても原子核の大きさと比べての話である。ほかの種類の力が及ぶ範囲はとても短い。例えば原子核中で陽子と中性子をくっつけている力は，約 10^{-13} cm という狭い範囲でしかはたらかない。陽子や中性子を構成するクォーク間にはたらいている力も，基本的には同じである。中性子崩壊を引き起こす弱い力は，特にニュートリノ実験などの多くの反応で観測されるが，やはり到達距離は非常に短い。20 GeV 以下の低エネルギーでは，弱い力はとても弱い。だからこそ，弱い相互作用とよばれているのである。実は，エネルギーが上がれば電磁相互作用と同じくらい強くなる。

歴史的には，力という概念は電磁相互作用や重力相互作用の研究から生まれてきた。物体どうしが直接に作用し合うという考えに始まり，長い道のりを経て，場の概念へと発展してきたのだ。一大転機となったのが，ファラデーによる場の概念の提案である。場は独立した存在だ。そしてエネルギーをもつ。だから場をつくるにはエネルギーが要る。例えば，磁場をつくりだすには，針金に電気を通さなければいけない。ニュートンの頃は，重力に伴った場の存在は想定されていなかった。地球と太陽の間の空間に，何かが存在すると考えている人など，誰一人いなかったのだ。しかし，電磁気学の出現により，エネルギーをもつ場というものを考えざるをえなくなってきた。そして，電磁場が存在し，波となって広がるというアイデアが生まれた。さらに光も，伝わってゆく電磁場の一種だという考えが出てきた。この重要な一歩を踏み出したのが，マクスウェルである。

量子力学によって，この点はもっと明確になった。電磁波は光子からできている。つまり電磁場は粒子で置き換えられる。光についてなら，それほど受け

入れにくい考えではないだろう。だが電荷をもつ物体の周辺にできる電場の場合はどうだろう。例えば水素原子中の陽子の周りの電場は？　この場を，光子の集合と考えてよいだろうか？

実際には，静的な場でさえも光子の集合と考えてかまわない。その場合の光子の性質は，光の中に存在する光子とは若干異なっている。そのような光子は，マスシェルからずれた光子とよばれる。詳しくは第4章で説明しよう。電荷をもつ陽子から連続的に光子が放出され，しばらくするとまた陽子に戻ってゆく。この描像は，まさに量子力学である。普通なら，動いている光子が止まることはないし，元に戻ることもない。だが量子力学では，短い間なら，このような奇妙な現象が起きる。光子のエネルギーが小さくなると，その時間はより長くなる。その間に陽子の側を通った電子が，陽子の放出した光子を横取りすることがある。このとき，電子は運動量やエネルギーをもらって進路を変える。物理学者は，陽子の電場による電子の散乱をこのように解釈している。

この考え方では，力の概念は意味をもたない。代わりに重要になるのが，陽子や電子が光子を放出・吸収する相互作用だ。力と考えていたものを，粒子の交換で置き換えたのである。まだまだ力についての説明は続く。もう少し詳しく説明しよう。

2.11　相互作用の分類

相互作用を分類する方法は何種類かある。初期には，相互作用の強さに注目して分類を行っていた。例えば，電磁気力と重力は，圧倒的に強さが違う。陽子2個にはたらく重力から生じる引力は，同じ陽子どうしにはたらく電気的な斥力に比べて，10^{36}倍も小さい。それでも我々が重力を感じるのは，粒子がたくさん集まると，それに比例して重力が加算されるためである。つまり，我々をつくっている粒子は，地球を形作るすべての粒子からの引力を感じとっている。しかし，個々の粒子の間にはたらく重力は，まったく観察不可能なほど弱い。

強さを基準に分類すると，相互作用は4種類に分けられる。強い相互作用，電磁相互作用，弱い相互作用，そして重力相互作用である。電磁相互作用の主役は光子である。電磁相互作用に分類されるすべての相互作用は，必ず光子と関係がある。同様に，強い相互作用には，常にグルーオンが関係している。弱

い相互作用には W 粒子か Z 粒子が，重力に関与しているのは重力子だ。ところが，相互作用の強さは一定ではなく，エネルギーに依存することが明らかになってから，強さによる分類はあやふやになってきた。高エネルギーでは強い相互作用は次第に弱くなり，ほぼ電磁相互作用と変わらなくなる。低エネルギーでは，弱い相互作用はとても弱いので，低エネルギーニュートリノは地球を簡単に通り抜けてしまう。非常に高エネルギー(大体 10000 GeV 程度)のニュートリノは，荷電粒子に対する電磁相互作用と同じくらいの強さで，物質と相互作用する。つまり，相互作用の強さのみによる分類は破綻してしまう。弱い相互作用と同程度の強さの「ヒッグス相互作用」もある。ヒッグス相互作用には，必ずヒッグス粒子(スピン 0 粒子)が関与しているが，W 粒子や Z 粒子は必ず関係するとはかぎらない。また，光子 1 個と，W 粒子か Z 粒子がそれぞれ 1 個あるいは両方，さらに，おそらくヒッグス粒子 1 個，といった粒子群が関係する相互作用もある。つまり非常におおざっぱにいうと，光子が関与する電磁気力と，重力子が関与する重力があるわけである。このいい方は現在でも使う。これらの相互作用が力として現れるマクロな現象との繋がりをよくするためだ。とにかく我々は多くの相互作用が存在することを知っているが，分類法はどれも一長一短なのである。

ではまず，結合定数という概念から入ろう。この定数は，相互作用が起きるときに必ず前にかかる数係数の因子として現れる。一般に相互作用の強さは，結合定数の大きさに比例する。例えば電荷をもつ粒子は，電磁場すなわち光子と相互作用する。この場合の結合定数は電荷である。電荷のない素粒子は，光子と相互作用しない。電荷が 2 倍の粒子は，2 倍強く相互作用する。重力はどうだろう。知ってのとおり，ニュートンの重力定数は，重力相互作用の強さを表す普遍的な定数である。もちろん，ほかの要素も相互作用に影響する。例えば，重力相互作用は，物体の質量に比例している。

素粒子物理学における電荷の役割は，大きく分けて 2 種類ある。この点は重要だ。量子数としての電荷には，厳密に保存される性質がある。他方，電荷は光子との相互作用の強さとして現れる。詳しくは述べないが，理論的に大変重要なことを書いておこう。すなわち，(光子のような)質量をもたないスピン 1 粒子に関する理論が意味をもつためには，結合定数は保存される量子数でなければならない。グルーオンや色電荷に関しても同じである。

これまでにも説明したように，ヒッグス粒子が関与するヒッグス力という仮説上の力がある。しかし，まだ実験的には証明されたわけではない。

たいていの場合，種々の相互作用に関係するそれぞれの粒子は，整数のスピンをもつ。ヒッグス粒子なら0，光子やグルーオン，WやZなどは1，重力子は2である。原理的にはスピン$\frac{1}{2}$の粒子だけが関与する相互作用があってもよいが，そのような相互作用には多くの理論的困難が伴う。繰り返しになるがここで強調しておきたいのは，力や相互作用の分類は，それほど明確なものではないということである。

2.12 電磁・弱・強・ヒッグスそして重力相互作用

しばらくの間，重力やヒッグス相互作用は脇に置いておこう。残り3種類の素粒子間にはたらく相互作用の研究から，相互作用の強さには大きな違いがあり，3種類の結合定数があることがわかった。とりわけ有名なのは，電磁結合定数，eである。電磁相互作用で起きる過程を表す際には，必ず$\alpha_{em} = e^2/4\pi \approx 1/137$という量が出てくる[b]。結合定数は$e$で，素電荷と等しい。そして$\alpha_{em}$は計算しているときによく出てくる組み合わせである。遷移の強さ，あるいは遷移の確率は[†]，実験的に測定される量で，結合定数の2乗に比例する。

2種類めは弱い相互作用である。付随するα_wは$\frac{1}{32}$になる。α_wはα_{em}の4倍以上大きいのに，弱い相互作用とよぶのを不思議に思う読者がいるかもしれない。ここでは何かの理由で低エネルギーになると，この相互作用は電磁相互作用よりはるかに弱くなる，とだけ述べておこう（WやZの質量が大きいことに関係がある）。弱い相互作用が発見された当時は，まだ実験室で高エネルギーをつくりだすことはできなかった。だから当時の弱い相互作用は電磁相互作用よりも，はるかに弱かった。例えば1兆分の1程度である。そのために，弱い相互作用と名づけられた。例をあげよう。太陽ニュートリノは地球をすんなりと通り抜ける。なぜなら，低エネルギーの太陽ニュートリノは，ほとんど相互作用をしないからだ。

---

[b] ここでは，$\hbar$やcを1とおく自然単位系を用いている。

[†] （訳者注）粒子の状態が相互作用により，ある状態から別の状態に変わることを，**遷移**するという。



エンリコ・フェルミ(Enrico Fermi, 1901-1954)　1934年，フェルミは弱い相互作用に関する初めての理論を発表した。彼は，光子を放出する陽子(陽子→陽子＋光子)と，電子-ニュートリノの対を放出する中性子(中性子→陽子＋電子＋ニュートリノ)が類似していることに気がついた。そして，電子-ニュートリノの対を，光子と同じように取り扱ったのである。考え方としては，中性子崩壊が実質的には2段階からなっている，つまり，中性子→陽子＋ W^- →陽子＋電子＋ニュートリノ，というステップを踏むとする現代の考え方と近いものがある。フェルミは彼の時代においてもっとも成功を収めた実験物理学者のひとりでもあった。世界最初の原子炉建設を指揮したのも，パイ中間子-陽子とパイ中間子-中性子衝突を研究することによって，実質的に物理学の新しい分野を拓いたのも彼である。

アメリカ合衆国の物理学にとって，フェルミの教育者としての重要性には計り知れないものがあった。1938年，ボーアが彼にノーベル賞受賞を告げた。フェルミの妻，ローラはユダヤ人だったので，フェルミ夫妻は受賞式があったストックホルムからイタリアに戻るのをやめてニューヨークへ移住した。そしてコロンビア大学の教授を務めた後，最終的にシカゴに移った。コロンビア大学時代の学生には，チェンバレン，T. D. リーやシュタインバーガーなどがいる。これらの学生たちを通しても，フェルミは合衆国の物理学に強烈な影響を及ぼした。ノーベル賞受賞者が共通にもっているものは？　と聞かれたフェルミは，「それほどないよ，知性すら共通していない(Not much, not even intelligence)」と答えている。





カルロ・ルビア(Carlo Rubbia, 1934)と**シモン・ファン・デル・メーア**(Simon van der Meer, 1925)は，弱い相互作用を媒介する粒子 *W* と *Z* を探す大実験計画において決定的な貢献をしたとして，1984 年にノーベル賞を受賞した。物理学の発展をもたらす翼が，技術の進歩であることは多いが，彼らの場合には，十分な密度の反陽子ビームをつくりださなければいけなかった。彼らが用いたのは冷却法という技術である。反陽子は高エネルギー衝突でつくられるが，始めは，いろんな速度でばらばらの方向に飛んでいる。方向を揃えながら，速すぎるものは減速し，遅すぎるものは加速して，最終的に同じ方向に同じ速度で飛ぶようにしなければならない。つまり十分に高密度な反陽子ビームができるまで，別の蓄積リングに蓄えた後に SPS 加速器に入れる。すると反陽子ビームは，陽子ビームと正面衝突して，たくさんの 2 次粒子をつくりだす。2 次粒子の数が十分多ければ，その中に隠れている *W* や *Z* を検出することができる。陽子と反陽子は，同じセルンの SPS 加速器の中を，反対方向に回る。初めの頃，SPS 加速器は 300 GeV の陽子を使っていた。

ファン・デル・メーアは，ニュートリノ実験において重要な役割を果たした「豊饒の角笛」(粒子を収束させて集める装置，ギリシア神話で山羊の角の形をした豊かさの象徴)の開発も行っている。この装置については，第 7 章で詳しく述べることにしよう。

ルビアと仕事をするには忍耐が要る。セルンの所長時代，3 週間に 1 度のペースで秘書を変えたほどだ。第 2 次世界大戦中の潜水艦や駆逐艦乗組員の平均生存時間でさえこれほど短くはなかった(前者は 18 週間，後者は 6 週間だった)。

3種類めの相互作用は，強い相互作用である。量子色力学(QCD)とよぶこともある。量子色力学は，色をもつ素粒子間の相互作用を表す(その束縛状態である中性子や陽子なども含む)。その相互作用の強さを α_{qcd} で表す。この大きさは1程度だが，高エネルギーになると小さくなる。

では，もう一度まとめておこう。まず電磁相互作用である。この相互作用には常に光子が関与しており，放出されることもあれば，吸収されることもある。光子は最初に見つかったスピン1の粒子である。質量は0である。しかし実験的には，非常に小さい値(6×10^{-16} eV以下)ながら，質量をもつ可能性も否定できない。光子は電荷をもつすべての粒子と相互作用する。次に説明するベクトルボソンもその一種だ。

弱い相互作用には，常に，いわゆるベクトルボソンが関与している。ベクトルボソンには3種類あり，2種類は荷電粒子で，1種類は電気的に中性である。電荷をもつのが W^+ と W^-，中性なのが Z^0 である。ベクトルボソンは重い。電荷をもつものは80.33 GeV，中性ボソンは91.186 GeVもある。W^+ と W^- はお互いに反粒子の関係にあり，Z^0 の反粒子は自分自身だ。ベクトルボソンはお互いに相互作用する。先ほど述べたが，荷電ベクトルボソンは，さらに光子とも結合する。

強い相互作用には，グルーオンが関与している。グルーオンは8種類あり，それらの相互作用は複雑である。それぞれのグルーオンは赤青緑の色と反色によって特徴づけられる。基本的な相互作用を説明していこう。青-反赤グルーオン，$g_{b\bar{r}}$ があるとする。このグルーオンが赤クォークにあたると，赤クォークは青クォークになる。赤を消滅させて青をつくるわけだ。このようなグルーオンが6種類ある。反赤-青，反赤-緑，反青-赤，反青-緑，反緑-赤，反緑-青である。ややこしいのはここからで，消滅させる色とつくる色が同じグルーオンも考えなければならないのである。反青-青のグルーオンの類だ。そのようなグルーオンを対角グルーオンとよぶこともある。対角グルーオンは3種類あるが，反赤-赤，反青-青，反緑-緑を同じ分量だけ組み合わせると，存在しないグルーオンになる。この混ぜ合わせたものを白グルーオンという。赤，青，緑を均等に混ぜ合わせると白になるからだ。だから，全部でグルーオンは8種類あることになる。グルーオンは色をもち，お互いに相互作用する。ただし白グルーオンは存在するとしても，ほかのグルーオンと相互作用はしない。グルー

オンは電気的に中性である。

次にヒッグス相互作用である。現時点ではまだ仮説だが，中性のスピン0の粒子，いわゆるヒッグス粒子が関与する相互作用である。ヒッグス粒子の相互作用の強さは相手の粒子の質量に比例するので，トップクォーク以外の粒子との相互作用は非常に弱い(質量が一番大きいトップクォークだけは例外で，弱い相互作用や電磁相互作用の強さよりも大きくなる)。

最後が重力相互作用である。関与する粒子は重力子で，スピンは2，質量は0である。以前から，重力子の質量が0でなければならないということは示されていた。素粒子間の相互作用の中では重力相互作用は断然弱く，あまり重要なはたらきはしない。直接測った唯一の実験は，非常に遅い中性子がほかの物体と同じように重力場に引かれて地球に落ちる現象である。

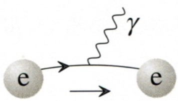
2.13　相互作用の図示

スピン$\frac{1}{2}$の粒子と，スピン1のいろいろな粒子の相互作用を図示しよう。まず光子から始めよう。光子はγで表す。知ってのとおり，電子は光子を放出する。光やラジオ波が出るのは，そのためだ。ラジオ波をつくるのは，アンテナを上下する電子である。つまり，電子は光子を放出する。この遷移を

$$\text{電子} \longrightarrow \text{電子} + \text{光子}$$

あるいは

$$e \longrightarrow e + \gamma$$



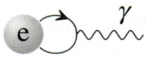
と表す。

図中の線に付いている矢羽は，(負の)電荷の流れの向きを表したものだ。また，下に書いてある矢印は，反応の起きる向き，つまり時間の流れる方向を示している。この反応はどちら向きにも起きる。何かを目で見るときなどに光が吸収される反応を示そう。

$$\text{電子} + \text{光子} \longrightarrow \text{電子}$$

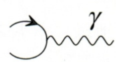
この反応を，電子から出た線が電子に戻る間に光を放出する図で表してみる

ことにしよう。



この反応はどちら向きにも起きるので，時間の向きを表す矢印は省くことができる。

3 世代のどの粒子でも，電荷をもつかぎり同じ遷移が可能だ。そこで，電子の部分を切り離して，光子との相互作用を，下図のように単に γ を出す線で表すことにする。



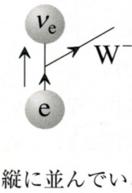
この図は，電荷をもつ粒子なら，素粒子の表のどの粒子にも重ねられる。例外はニュートリノだけだ。同じことは反粒子についても当てはまる。反粒子も，同じように光子に結合するからだ。したがって，この小さな図は，すべての荷電粒子とその反粒子にくっつけられる。そうすれば，実際の自然界で起こる過程に対応する。例えば，反 τ 粒子に重ねた場合には，反 τ 粒子が光子を放出したり吸収する過程を表す。これは，どんな反応が可能かをうまく示すやり方である。

弱い相互作用のベクトルボソンについても，同じように表せる。W^- の場合の基本となる相互作用なら，このように表す。

$$\text{電子} \longrightarrow \text{電子ニュートリノ} + W^-$$

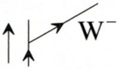
記号を用いると下のようになる。

$$e \longrightarrow \nu_e + W^-$$



3 世代の素粒子表で，同じ灰色の網掛け部分内にあって，縦に並んでいる粒子の組み合わせに対しても，同じ相互作用が起きる。しかし，例えば ν_e と d_γ の間では起こらない。以前に，同じ網掛け部分内の上下に並んだ粒子対は，弱い相互作用でお互いに結びついていると述べたのは，実はこういう意味だった。つまり，W との相互作用で互いに結びついているのだ。

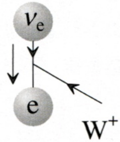
対になっている粒子を結ぶ線から W^- が飛び出す図で，W^- の相互作用を表すことにする。



このとき，対になった粒子の電荷は1だけ異なっている。W^- の電荷は−1なので，相互作用で電荷が保存されるためには W^- と相互作用する前後で，粒子の電荷が1，変化しなければならない。だから，ニュートリノがクォークに変わって W^- を出す相互作用は許されない。電荷の保存則が破れてしまうからだ。以前に説明したように，自然界では電荷は厳密に保存されている。

W^+ のほうも，同じような図に示すことができる。基本的過程は，

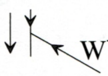
$$\text{電子ニュートリノ} \longrightarrow \text{電子} + W^+$$



あるいは記号を用いると次のようになる。

$$\nu_e \longrightarrow e^- + W^+$$

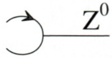
素粒子表の灰色の網掛け部分内で，縦に並んだすべての粒子対についても，同じ相互作用がある。



W^+ につけた矢印は W^- と逆向きである。これは(負の)電荷の流れる向きが逆になったことを示すためだ。本章後半部分では，矢印を多少異なった意味で，主に粒子と反粒子を区別する意味で使う。W^+ は W^- の反粒子なので，ここで使う矢印の向きは，どちらの場合にも当てはまる。

このとき，CKM混合のおかげで生じる厄介な点については，第3章で詳述する。CKM混合によって，アップクォークがストレンジクォークとへ変化することもあるのである。実際，世代が変わる相互作用がすべて可能になるのだ。例えば，トップクォークがストレンジクォークと W^+ になったり，ダウンクォークと W^+ になったりする。ここでは，この世代が変わる相互作用については説明しない。

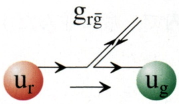
電荷をもたないZ^0の相互作用は粒子の種類を変えないので，光子の場合に近い。ただし，ニュートリノとも相互作用する点で，光子とは違っている。下の図は，3世代の素粒子の表のどの粒子にも重ねることができる。



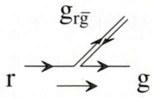
反粒子の表で，粒子の上下を入れ替えて描いたので，この図は反粒子の場合にも使うことができる。例えば，反電子ニュートリノなら，W^-を放出して陽電子になる。同様に，反ボトムクォーク(電荷$\frac{1}{3}$)はW^+を放出して反トップクォーク($-\frac{2}{3}$)になる。電荷の変化は$\frac{1}{3}\to-\frac{2}{3}+1$だ。

強い相互作用にはグルーオンが関係している。この遷移は少し複雑だ。例えば，赤のアップクォーク(u_r)から緑のアップクォーク(u_g)へ変化するときに放出されるグルーオン($g_{r\bar{g}}$)は，赤の色電荷1と緑の色電荷−1(すなわち反緑の色電荷)をもつ。

$$\text{アップ}_{\text{赤}} \longrightarrow \text{アップ}_{\text{緑}} + \text{グルーオン}_{\text{赤}\overline{\text{緑}}}$$

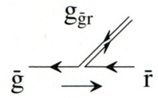


このグルーオンは，ダウンクォークやチャームクォークなどのほかのクォークに対しても同じように振る舞う。ほかの場合と同じく，グルーオンの相互作用もクォークの種類にかかわらず図示できる。



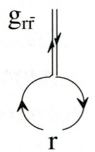
2重線でグルーオンを，矢印で色電荷の流れを示してある。同じグルーオンは，反粒子に関する図にも現れる。例えば，反緑クォークから反赤クォークへの変化では，上の場合と同じグルーオンが放出される。

線につけた矢羽は，時間経過ではなく，色電荷の流れを示している点には注意してほしい。繰り返すが，後になると，線につけた矢印の意味を変更して，



粒子と反粒子を区別するために用いるようになる。この図における色電荷の流れを見ると，緑の色電荷−1が赤の色電荷−1に変化するので，放出されるグルーオンは緑が−1で赤が+1の色電荷をもつことになる。

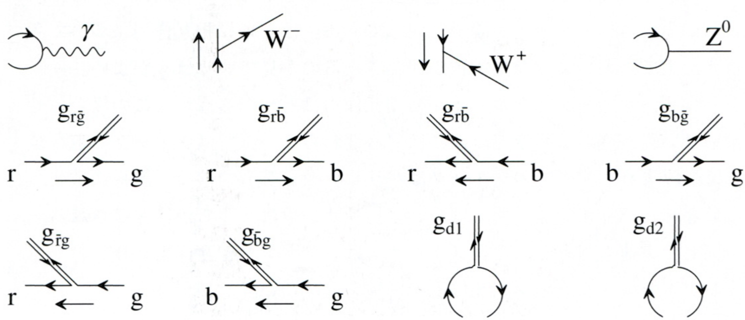
対角グルーオンは始めと終わりのクォークの色電荷を変えない。



この図は，赤クォークが赤クォークに移る際に，(赤，反赤)グルーオンを放出する様子を示したものである。

次図は，力を媒介するすべての粒子をまとめたものである。Z^0とW^+，W^-以外の粒子には質量がない。対角グルーオンには2種類ある。それぞれ，赤-反赤，青-反青そして，緑-反緑の独立な組み合わせになっている。図中にはd1とd2という記号で示してある。

光子や，すべてのグルーオンの質量は0，W^+とW^-の質量はともに80.42 GeVで，Z^0の質量は91.188 GeVである。



ひとつだけ図にない粒子がある。重力子である。光子 γ や Z^0 に似て，重力子は，本章で説明したスピン1粒子も含めたすべての粒子と相互作用する。相互作用の強さは，相手粒子のエネルギーに比例している。相手粒子が静止している場合は，その粒子のエネルギーは本質的には質量に等しい。だが，光子のように質量のない粒子とも相互作用する。その場合の相互作用の強さは，光子エネルギーに依存する。星から出た光子は，太陽の近くを通過して地球に到達するまでの間に曲げられる。この現象は日食のときに観測される(この行を書いているときにも日食が起きている)。この直進運動からのズレが，重力子と光子との相互作用の結果である。

未発見のヒッグスボソンも入れていない。ヒッグスボソンは，粒子の質量に比例した強度で，すべての粒子と相互作用をする。だからニュートリノの質量が0なら，ヒッグス粒子とは相互作用しない。とにかく，ヒッグスボソンを発見するのが先決である。存在するとしたら，ヒッグス粒子は113 GeV以上の質量をもつ。

これまで紹介してきたのは，クォークやレプトンの相互作用のみであり，グルーオンどうしの相互作用や，荷電 W 粒子と光子との相互作用などは入っていない。

2.14 量子数の起源

量子数について，もう一度考えてみよう。素粒子間の相互作用では，常に量子数が保存されると思うかもしれない。しかし，この点については，卵が先かニワトリが先か論争と同じである。はじめに相互作用について考えた上で，どのような量子数が保存されるのか見ていくほうがよい。

まず，クォークとグルーオンの相互作用はどうだろうか。この場合，せいぜい色が変わる程度でほかには何も変わらない。ではクォークの数を数えてみよう。すべてのクォークはバリオン数 $\frac{1}{3}$ をもつので，簡単に数えたいなら，バリオン数を使えばいい。バリオン数は，明らかに保存される。同じく電荷も保存される。グルーオンはレプトンと相互作用しないので，レプトンはグルーオン相互作用の影響を受けない。

次に，光子との相互作用である電磁相互作用である。始めにあった粒子と最後に残る粒子は変わらない。例えば電子が光子を放出する場合には，電子→電子＋光子となる。光との相互作用では，始状態と終状態の粒子が同じなので，明らかにすべての量子数が保存される。

さて，弱い相互作用，すなわちクォークもしくはレプトンとベクトルボソンの相互作用を考えてみよう。クォークをレプトンに変えるような相互作用は存在しない。始めにクォークがあれば，ベクトルボソンと相互作用した後も，クォークが残る。ただし別の種類のクォークに変わることもある。例えば，アップクォーク→W^+＋ダウンクォークといった反応も起きる。このような反応では，すべてのクォークのバリオン数は同じなので，バリオン数は保存されている。同じようにレプトン数も保存される。さらにレプトンどうしの弱い相互作用は，同じ世代のレプトン対の間でだけ起きるので，電子数，ミューオン数，タウ数は，それぞれ個別に保存される。ただし，ニュートリノが質量をもつとすれば話は変わる。

もしCKM混合がなければ，クォークが弱い相互作用した後に残るクォークも，同じ世代のものに限られる。つまり，アップ→ストレンジ＋W^+という反応は起こらない。その場合には，電子数と似た状況になり，アップ-ダウン数，ストレンジ-チャーム数，そしてトップ-ボトム数が，それぞれ個別に保存される。実際にはCKM混合のため，世代が変わる相互作用(例えばアップからストレンジなど)が起こる。しかしながら，世代が変化するのは，W^+やW^-によって起きる弱い相互作用に限られる。Wはとても重いので，低エネルギー状態では，Wが引き起こす相互作用は非常に弱くなる。そのため，弱い相互作用による粒子の崩壊は比較的ゆっくりと進行する。ある量子数がほかのすべての相互作用では保存されていて，弱い相互作用でだけ破れている場合には，その保存則を破る粒子崩壊はゆっくり進むことになる。こういった考えが出てくる以前，物理学者は，「ストレンジネス(奇妙さ)」という量子数を使っていた。現在ではストレンジネスが果たしていた役目は，ストレンジクォークの個数で置き換えられている。K中間子，つまりクォーク1個と反クォーク1個からなる束縛状態は，弱い相互作用により(ストレンジクォークを含まない)パイ中間子

2個へと崩壊する。ストレンジネスは弱い相互作用以外のすべての相互作用で保存される。部分的に保存されているわけである。相互作用を考えに入れて量子数を見直すと，近似的な保存則という考え方に至る。

3 量子力学，状態混合

3.1 序　論

素粒子の力学は，テニスボールや惑星，ミサイルなどの古典的物体とは違っている。後者，つまりテニスボールなどの物体の動きをうまく記述したのが，ニュートンの運動法則である。他方，素粒子の動きを記述する法則が量子力学である。量子力学の世界の法則は，ニュートンの運動法則とはまったく違う。しかし粒子が十分重い場合には，量子力学とニュートン力学の予測はきわめて近くなる。素粒子は，古典的物体と似たように振る舞うこともある。場合によっては，ニュートン力学によって扱われることも多い。とはいえ，これら2種類の力学の間には重要な差があるので，それぞれについてある程度知っておいてほしい。

本章では，2種類の概念について論じておこう。まず，量子力学では，銃弾の軌跡と同じような方法では粒子の軌跡（弾道）を計算することは不可能だということ，つまり，量子力学は確率の世界ということだ。粒子の軌跡は，粒子がある確率で通るかもしれない経路，という意味しかもたない。正確に言えば，刻一刻と粒子の軌跡を（空気中を飛んでいく銃弾を追跡するのと同じように）たどることは不可能である。我々には，発射した粒子がどこに行くのか推定することしかできない。粒子が行く場所は正確にはわからない。それぞれの場所にやってくる確率を計算して，飛んでくる確率が高い場所を知ることができるだけだ。光を例にとって説明しよう。光については，量子力学以前の物理学でも，電磁波を用いれば正確に説明できる。だがその説明は，光が光子という粒子からなっていることを考慮して，もう一度再考する必要がある。

本章で紹介するもうひとつの概念は，2乗すると物理的予言を計算できる量，つまり振幅である。光について考察することは，この点の理解を深める助けにもなるだろう。

3.2　2枚のスリット実験

光は電磁場にほかならず，波としてうまく記述できる。この考えが初めてホイヘンス(Huygens)によって提案された頃，ニュートンは光は粒子だ，という考えを主張していた。当時に戻り，彼らに話し合いをさせたらおもしろいだろう。2人が，答えをすべて知っている未来からの訪問者を凝視する様子を想像してほしい。ニュートン(あるいはホイヘンス)がまず尋ねる。

光とはなんだ？　波か，それとも粒子か？

答えは，

そうだな，両方だ。

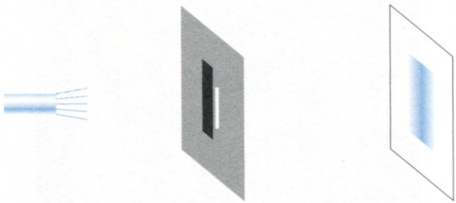
ニュートンとホイヘンス，どちらにとっても，この回答はおもしろくないだろう。彼らを納得させるには，量子力学を教え込む以外にないかもしれない。

もっと正確に答えたければ次のようにいえばいい。粒子がたどる軌跡は，「波」を使って近似的に計算することができる。計算に関しては，これは正しい。だが，だからといって粒子が「波」である，というわけではない。波の理論を使えば，粒子がどこに行くか，うまく計算できるだけである。粒子の動きを記述するのが波の理論なのである。つまり，波の理論は粒子自身について述べているわけではない。我々の知るかぎり，粒子は小さな点状の物体で一定の質量をもつ(光の場合，質量は0)。つまり正確に答えようとするなら，光は粒子だが波の法則に従って動く，といえばよいだろう。

音が波として記述できるのと同様，光は波として記述できる。波は干渉する。その様子を示す古典的な実験は，2つのスリット実験である。実験装置を示したのが次の図である。光源から放たれた単色の光は，2つの並んだスリット(穴)に当たる。この実験向きなのがレーザー光である。スリットの後ろには，光が当たるスクリーンがある。単色ということは，光の振動数が一定ということだから，光源から放出される光はすべて同量のエネルギーをもつ。このエネルギーはアインシュタイン-プランクの関係式 $E = h\nu$ で表される。

混乱を避けるために，光源が放つ光はとても弱く，光子は1分間に1つずつ飛び出すとしよう。そうすれば，前の光子がスクリーンに衝突してから，次の光子が光源から出るまでには十分な時間がある。このように光子の数を少なくしておくと，ビーム中の異なる光子が干渉し合うことはない。厳密に光子1つだけを用いた実験なのだ。

まず片方のスリット(1番めとよぼう)を開けっ放しに，もう片方のスリットを閉じておく。



開いているスリットを通過した光子はスクリーンに衝突する。光子の衝突場所は，ある程度しか予測できない。だが数時間の間光子を出し続ければ，スクリーン上にパターンが形成される。光子がスクリーンに当たってできたスリットの像は，広がってぼやけている(スリットの幅があまり大きくないときにだけぼやける)。この現象は，スリットの縁によって起こる波の回折(散乱)だと考えられる。回折理論を知っていれば,スリットの像を正確に計算できる。個々の光子がスクリーンに衝突してできる点は，点の数が多くなるにつれて，波の回折理論で計算したスリットの映像に近づいてくる。1分間に1個の光子の割合なら数週間かかるかもしれない。実際，そうなのである。

光のこのようなおかしな振る舞いから，何がわかるだろう。光が粒子だとしたら，光の強度とは一体何を意味するのだろうか。答えは明らかだ。光の強度は，光子数に比例している。だから光が強いということは，光子がたくさんあるということである。このように考えれば，光の強度がエネルギー密度に比例することともつじつまが合う。個々の光子は一定のエネルギーをもっているのだから。では光子がパターンをつくるとして話を進めよう。多くの光子はスリットの像の中心部に当たる。縁に近づくほど,飛んでくる光子数は減るであろう。光子は1つずつ飛んで来るので，スクリーン上にできた像を解釈する仕方は1



ヴェルナー・ハイゼンベルク(Werner Heisenberg, 1901-1976)は量子力学に関する最初の論文を書いた人物である。なじみのない数学(行列計算)が使われていたので，この論文はとても読みづらかった。1927 年，ハイゼンベルクは有名な不確定関係を提唱した。それ以後も，素粒子物理学における彼の基本的業績は枚挙に暇がない。例えば陽子と中性子には，強い相互作用に関するかぎり，差がないことを発見して数学的に定式化したのも彼である。確かにハイゼンベルクは，物理学の歴史上，もっとも偉大な人物のひとりだろう。1932 年，彼はノーベル賞を受賞した。だが第 2 次世界大戦中におけるハイゼンベルクのナチスドイツに対する態度は，どう良くいおうとも，曖昧だった。戦争中，彼はウランの核分裂についての研究計画に携わっていた。しかしこの計画は原子爆弾の完成には至らないままだった。ハイゼンベルクは実験が苦手だったのである。我々にとっては幸運だったが，原子爆弾が失敗したのは，おそらく，そのせいもあるだろう。

第 2 次世界大戦後，ハイゼンベルクは，マックス・プランク協会の創設に尽力した。マックス・プランク研究所も属する協会である。卓越した研究拠点をつくるという方法は，非常に実り多いものとなった。ハイゼンベルクは晩年，「統一理論(theory of everything)」の完成を目指した。だが，彼の統一理論は印象的とは言いがたかったし，成功もしなかった。以前に共同研究者だったパウリも手厳しく批判している。



エルヴィン・シュレディンガー(Erwin Schrödinger, 1887-1961)は，1926年彼流の量子力学の定式化を提唱した。波を使って粒子を記述する彼のやり方は，一番わかりやすい方法として，今日でもなお，原子や分子を量子力学的に扱う際にもっとも使われている方法である。その基本方程式のシュレディンガー方程式は，粒子の速度が非相対論的（光速に比べてずっと遅い）なときに成り立つ。したがって，原子や分子中の電子に対しては正しい。彼は1933年にノーベル賞を受賞した。

シュレディンガーがすばらしい考えを思いついたのは，ちょうど性的に昂揚していた時期と一致していた。ある女性とスイスのアローザで休暇を過ごしていたときのことである。明らかに，この逃避行は彼の科学的創造力に大きな影響を与えている。彼の創造力は，その後12か月間にわたって最高水準だった。彼の人生には，多くの女性が関わっている。妻のアニーは有名な数学者のヘルマン・ワイルと（恋愛）関係を続けた。

人生も後半に入った1939年以降，シュレディンガーはアイルランドのダブリンに新設された高等研究所で過ごしている。驚いたことに，カトリック国であるアイルランドで，2人の女性とともに暮らすことに支障はなかったらしい。妻のアニーと，ヒルダ・マーチ（彼女との間には娘のルースが生まれた）が一緒だった。

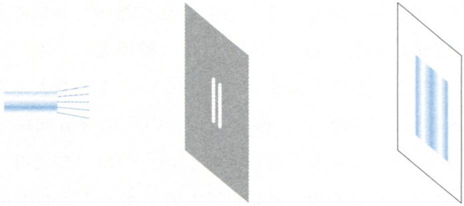
通りしかない。スクリーン上のパターンは，光子がそれぞれの場所に衝突する相対確率を表していることになる。相対確率は像が明るい場所ほど高く，端のほうは低い。波の伝わり方に関する理論を使って光の伝わり方を計算すれば，スクリーン上の模様が理論的にわかる。この模様は，スクリーンのどこに光子が衝突するかの相対確率を示している。

単純化すると，これが量子力学の核心だ。波の振る舞いが物体の古典的な軌道とあまりに異なるので，多くの人がこの考えを受け入れることができなかったのも不思議ではない。といっても，詰まるところ，それほど難しいことではない。計算に波を使うことで，その場所で粒子を発見できる確率が計算できるということだ。

話がややこしくなるのは，光源を出た粒子が，どのようにしてスリットをすり抜けてスクリーンに達するかを知りたい場合だけである。本書の目的は読者を困らせることではないので，光源からスクリーンまでの光子の軌跡について深く追求したり，空想したりするのはやめよう。重要なのはスクリーン上に見える事柄である。粒子は連続的な軌跡を通るのか，などと問わないようにしよう。それについてはわからない。だから忘れることにしよう。我々が粒子について関心があるのは，ある距離を飛び越えた粒子が決まった確率でスクリーン上の点に衝突することだけである。スリットを通ったかどうかはまったくわからないし，どんな方法を使っても知ることはできない。我々にできることは，ただスクリーン上における確率を計算することだけである。

1番めのスリットを閉じて，2番めのスリットを開けた状態で実験を繰り返すとどうなるだろうか？　答えは簡単だ。少しずれた位置に，まったく同じパターンが出てくるだろう。ずれているのは，2番めのスリットが1番めのスリットから少し離れているからである。

では両方のスリットを開けてみよう。単純な人はスリットを通り抜ける光子は粒子だと考えるだろう。そして新しく浮かびあがる像は，2つのスリット像を足したものだと考えるはずである。だが，違う。干渉が起こるからだ。つまり，1番めのスリットから来た波が，2番めのスリットから来た波を打ち消したり強めたりする場所ができる。波の理論を使えば，このような確率を計算するのは簡単である。この干渉縞の存在が，ホイヘンスが正しくニュートンが間違っているという決定的な論拠となっていた時代もある。我々がどれだけ注意



深くなければならないかがわかるだろう。

このような干渉現象は，いったいどのように理解すればよいだろうか。特別なことは必要ない。波の理論を用いて，期待されるパターンを計算すればよい。そうすれば，しばらく実験を続けたときに現れる干渉パターンの確率分布がわかる。それだけだ。それぞれの粒子の動きは予測できない。だが多くの粒子の結果を集めると，最終的には，正確な形状が予測できる。ルーレット盤のようなものである。ルーレットの球がどこに止まるかはわからない(まっとうな賭場ならば)。しかし長い間見ていると，球はすべての穴に均等に落ちるだろう。もし盤に細工がしてあれば，止まりやすい場所のパターンが見えてくるだろう。

くどいようだが，この実験では光子が飛ぶ間隔を空けて，1個ずつ飛んで行くようにしている。おおざっぱにいえば，光子がお互いに干渉することは決してない。ただ自分自身と干渉するだけである。個々の光子は，到達する確率に干渉効果が現れるように運動する。もちろん自分自身と干渉しあう粒子という考え方は馬鹿げている。実際に想像しようとしたら，頭痛がしてくるだろう。光子がどこに到達するのかを計算しようとするとき，あるいは，ある場所に光子が飛んでくる確率を計算しようとするときに，干渉効果が生じる。

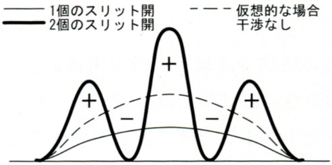
3.3　振幅と確率

2枚スリット実験から引き出せる結論は重要だ。計算に使った波は2枚のスリットを通過し，互いに強めあったり弱めあったりする。波には，正負の符号があることもある。水面の波を思い浮かべてほしい。平均的な高さ(波がない場合の水面)よりも高い部分と低い部分がある。波どうしが出会えば干渉する。そ

の結果，山と山，谷と谷が重なって，さらに高くなったり低くなったりする所もあれば，山と谷が打ち消しあう所もできる。確率というものは，常に正の値をとり，1より大きくなることはない。負あるいは1より大きな確率はありえない。−20% あるいは 100% 以上確実だ，という場合も同様である。何かを確信するとき，0% 以下の確率で確信するというのは，つまり，まったくわからないということだ。もちろん，100% 以上確信することも不可能である。

波の強度は，波が上下に揺れる幅と関係がある。揺れる幅の平均値からのズレの最大値(波の山か，谷の部分)を振幅という。波の強度は振幅の2乗に比例する。少し詳しく説明しよう。

両方のスリットの像が重なり合う理想的な場合を考えてみよう。重なりの中心部で，波はお互いに強め合う。反対に，中心部から少し離れたところでは弱め合う。中心からの距離に伴って，このパターンが繰り返される。こうして現れる干渉縞が2つのスリットを開けたときの図に示されている。スクリーン上を水平方向に移動する際の光の強度変化を太い線で示したものが，下の図である。



おおまかな様子は図のようになる。片方のスリットが開いていると，光が当たる場所ができる。そのときのスクリーン上の光強度は，図中に細い線で描いてある。もう一方のスリットだけが開いている場合も同じようになる(スリットの位置が変わることで生ずる多少のズレは気にしない)。両方のスリットが開いていたらどうなるだろう。光は前と同じ場所に来るだろう。だが，2つのスリットからの波が強め合う場所や，互いに弱め合う場所ができるだろう。その場合のエネルギー分布について，詳しく考えてみよう。個々の光子は一定のエネルギーをもっているので，エネルギーの分布は結局光子の数の分布になる。

どちらか一方のスリットだけが開いている場合，エネルギーの分布は細い曲線のようになる。エネルギーがもっとも大きいのは中心部で，両端に行くにし



マックス・ボルン（Max Born，1882-1970） ハイゼンベルクやディラック，シュレディンガーに比べると一般にはあまり知られていないが，ボルンは量子力学の創設者のひとりとしてあげるのにふさわしい人物である。彼は波動関数と確率の関係を定義して，数学と物理的観測を結びつけた。すなわち，確率が振幅の 2 乗になることを見いだしたのである。そして 25 年後の 1954 年にノーベル賞を受賞した。

確率が物理学の基本的な性質となることを受け入れなかったアインシュタインとボルンの間には議論が巻き起こった。アインシュタインからボルンに宛てた 1926 年の手紙の中に，次の有名な文章がある。「量子力学は非常に印象的です。しかし，私の内なる声は，それは本物ではないと告げます。この理論は多くのものをもたらしてくれますが，創造主の秘密には少しも近づけてくれません。私は，どんなことがあっても，神はサイコロを振らないと確信しています」。

アインシュタインが，量子力学に反対する確固たる論拠をもたないことを認めているのはおもしろい。彼は量子力学の存在を単に望まなかっただけだ。もしかすると，量子力学と彼の重力理論との間で，何か矛盾が起きるのではないかと感じていたのかもしれない。今日でも，正しい量子重力理論ができあがっていないというのは不思議である。例えばブラックホールに関しては量子力学の基本法則は成り立たないし，誰も納得できる考え方を思いついていない。どうすればよいのだろう。ブラックホールを捨てるべきか，それとも量子力学を捨てるのか？

たがって次第に少なくなる。エネルギーの総量(光子の総数)は，曲線の下の部分の面積に比例する。

次に両方のスリットを開けてみよう。干渉がなければ，破線で示す仮想的曲線になるだろう。エネルギー総量は，単純に倍になる。つまり破線の下にある面積は，細い曲線の下にある面積の2倍になっている。そこらに広がっている光子数が2倍になっていると思えばよい。中心部では，点線曲線は，細い曲線の2倍の高さになっている。つまり，そこに来る光子の数も2倍ということである。

干渉の存在を忘れないでほしい。干渉しても光子の総数は変わらないので，光子の数はスリットが1枚開いている場合の2倍になるであろう。大きく変わるのは，光子の分布である。中心部では光の波は互いに強めあう。一方，中心から少しずれると互いに打ち消しあう。仮想的曲線では，中心からわずかにずれたあたりに行くはずだった光子が，今度は中心部に行く。図中には，＋と－で示してある。中心部にある余分な光子は，周りからやってきたものである。つまり中心部の光子数は干渉しない場合の2倍になっている。スリットが1枚開いている場合と比べると4倍である。中心部の太い曲線は細い曲線の4倍高い。

ここで光波の振幅について考えてみよう。スリットが1枚開いている場合には，中心部の振幅にはある程度の幅があるだろう。だがスリットを2枚とも開くと，中心部に来る波は互いに強め合う。そして，振幅は2倍になる。水面のさざ波を想像してほしい。波の山の部分では，水粒子はその高さまで上がってきている。同じ高さの波どうしがぶつかると，位相が合っている(山どうしが重なる)ときには，2番目の波が山にある粒子を同じ高さだけ持ち上げるので，波の高さは合計2倍になる。つまりスリットが2枚の場合，中心部の振幅が1枚の場合の2倍になる。だがすでに議論したように，中心部に到達する光子数はちょうど4倍だ。振幅が2倍になると，光子数は4倍になる。つまり**光子数は振幅の2乗に比例する**。実は，この事実を使えば，振幅の符号が負になる問題まで解決できる。たとえ振幅が負になっても，その場所に光子を見いだす確率は振幅の2乗に比例するので正の値をとるのだ。

スクリーンに当たるエネルギー総量は，干渉が起こっても変わらない。だが分布は変化する。中心部に余計にエネルギーが来るのは，周辺領域に行く分が

減ったためである。

この手の議論には注意してほしい。干渉というのは，とても複雑な現象なのである。

実は量子力学の本質にかかわる部分が，これまでの話と関連している。確率の保存である。確率の保存に関する理論は，ある粒子がスクリーンのどこかにぶつかる確率を足し合わせたものが，100% になることを保証するものでなければならない。粒子は途中で消えたりせず必ずどこかには行くので，全確率は 100% になる。つまり，ここにぶつからなければ，必ずどこか別の場所にぶつかっているはずだ。その粒子が不安定で，スクリーンにぶつかる前に崩壊する場合には，崩壊した状態も確率の計算に含めなければならない。スクリーンにぶつかる確率と，どこかで崩壊してしまう確率を加えると 100% になるはずである。

結論はこうだ。可能な経路が 2 つ以上ある場合，それぞれの経路にそれぞれの振幅の波が対応する。これらの波を重ね合わせると，(強め合ったり弱め合ったりして)別の振幅をもつ波が生まれる。その波の振幅を 2 乗すると，確率の分布がわかる。

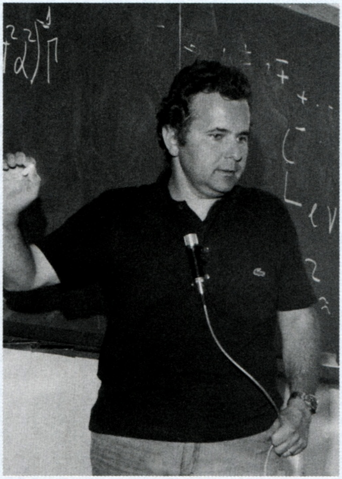
静寂を生み出す機械の話をご存知だろうか。高速道路際など，どこかうるさい場所に音を出す装置をつくったとしよう。この機械は，周りの騒音をちょうど打ち消せるような音を出すようにつくってある。といっても，エネルギーの行き場所は不可欠である。音の波が干渉してゼロになる地点があるということは，どこかに必ず波が増幅されている場所があるということである。実際に静寂を生み出す機械をつくることはできない。音波の波長によって，騒音分布を少々変えることはできるが，結局はさらに騒がしくすることになる。本当に音を消したかったら，音源からエネルギーが放出されないようにするしかない。

素粒子物理学では，2 つの振幅が互いに打ち消しあうことができる。全体として考えると，2 つの振幅どうしが完全に打ち消しあうなら，何も生じない。音について，別の例を考えよう。箱に入っていないスピーカーが放出する振動数の小さい低音だ。スピーカー後方から出た音波は，回ってきて正面に戻る。そして，前方から出てきた音波と打ち消しあうように干渉する。結果的には，何も聞こえないだろう。そのスピーカーにエネルギーを注入することはできない。スピーカーの円錐(コーン)は前後に振動するが，周りの空気にはエネルギー

はほとんど放出されない。スピーカーの正面から背後にかけて，わずかな空気が前後に移動する。つまりスピーカーのコーン自体の運動や，スピーカー周辺の薄い空気層の運動に使われるエネルギーもあるにはあるけれど，ほんの少量である。このときに大切なことは，低振動数(波長が大きい)の場合，後方からやってくる波は少し余計に走ってくるけれど，前方から出る波とは依然として反対位相になっているということだ。ただしスピーカーの直径より波長が短くなると，この効果は消滅してしまう。スピーカーが箱に入っているのは，こういう理由である。後方から出る低振動数の音を箱で遮るのである。防音壁の穴の部分にスピーカーを設置してもよい。そうすれば，壁の両側で，低周波の音でも再現できる。

波のエネルギーが振幅の2乗に比例するという特徴は，さまざまな現象で成り立つ一般的なものだ。スピーカーのコーンの前後の動きが2倍になると，(元の場合に比べ)放出されるエネルギー量は4倍になる。直観的には理解しづらいかもしれないが，真実である。混乱したかったら頭の中にスピーカーを思い描いてその動きを想像すればよい。ひとつのスピーカーの音が，ほかのスピーカーのコーンまで届くと，影響を与えてしまうことを忘れないでほしい。どうしても話がややこしくなってしまって申し訳ないが，スピーカー技術はとても複雑なのだ。これまで議論していたのは，単色光だったことにも注意しておいてほしい。2個のスピーカーから出てくる音波を重ね合わせると，得られる音波も単色，すなわち，同じ振動数になる。そして干渉が起こり，今まで述べてきたことが同じように成り立つ。

電気回路に詳しい人のために，電気の例をあげよう。ある回路に電流が流れ込んでいるとき，1秒間に消費されるエネルギーがワットで，電流と電圧を掛けた値だ。電流自体は電圧に比例するので，消費エネルギーは，電圧の2乗(あるいは電流の2乗。好きなほうで考えればいい)に比例する。これは先ほどのスピーカーの場合にも当てはまる。スピーカーのコーンの揺れは，スピーカーコイルを流れる電流に比例する。したがってスピーカーに供給されるエネルギーは，電流の2乗に比例する(エネルギーは，電流をI，スピーカーのインピーダンスをRとしたとき，I^2Rに等しい)。箱に入っていないスピーカーなら，インピーダンスは低振動数では誘導性なので，スピーカーはまったくエネルギーを消費しない。コーンがついていないコイルとよく似た状況になる。その



ニコラ・カビボ(Nicola Cabbibo, 1935) 1963 年頃，素粒子物理学はとても混乱した状況にあった。さまざまな強度でいろいろな終状態に崩壊する不安定な粒子が次々と見つかっていたのである。もちろん，今ではクォークの束縛状態だということがわかっている。

まずゲルマンとレビが論文の脚注に，いくつかの終状態への崩壊が一定の比率で起こるというアイデアを書いた。彼らは，その比を角度として表せることを認識していたが，深くは追求しなかった。その事実のもつ意味合いに気づかなかったのだ。残念なことをしたものだが，気にするまい。

そして，それぞれの粒子が終状態へ崩壊する相対的な強さについて説明できる理論をつくりあげたのが，カビボだった。回転角を知るには，例えばパイ中間子がミューオンとニュートリノに崩壊する強さと，同じ組み合わせに K 中間子が崩壊する強さの比を測ればよい。この角度を用いると，中性子崩壊とミューオン崩壊(→ 電子＋ニュートリノ＋反ニュートリノ)の比を計算することができる。当時，多くの人はいろいろな崩壊の強さがそれぞれ異なることに当惑していた。私もそのひとりだった。その頃セルンで，私の隣の部屋で研究していたカビボは，あるとき中性子とミューオンの崩壊比が理解できたと話してくれた。彼が謎めかして，「それは角度なんだ」と言うので，私は「ほう，それならカビボ角と呼んだらどうだい」と答えた。この冗談は事実となり，実際にカビボ角と呼ばれるようになった。

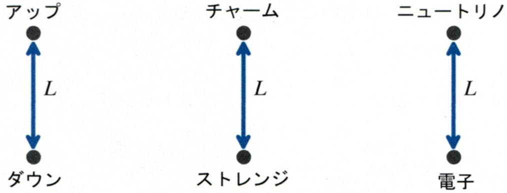
カビボ角の出現によって素粒子物理学界の混乱は収まり，カビボ角はその後の素粒子理論の発展に重要な役割を果たすこととなった。

場合も，コイルはスピーカーの磁場の中を自由に動くだけでエネルギーは吸収しない。上質のスピーカーは，どんな振動数領域でも純粋な抵抗のように振る舞う。

3.4 カビボと CKM 混合

素粒子と，3 種類のベクトルボソン W^-，W^+，Z^0 との相互作用(結合ともいう)に話を戻そう。これまでに比べて少し複雑な所もあるが，出てくる結論は重要である。まず以前述べたように，遷移強度と結合定数の違いを強調しておこう。アップ → ダウン＋W^+ という遷移に含まれる結合定数 g は一定の数だ。遷移強度，すなわちこの反応の遷移確率は，実験的に測定できる量で，α_w に比例する。α_w は g の 2 乗を 4π で割ったものである。言い換えると，結合定数には符号がある(例えば，素粒子の電荷には正負がある)。しかし，遷移確率は遷移振幅の 2 乗に，したがって結合定数の 2 乗に比例するので，いつでも正である。実は，この操作は，前節で述べた 2 乗する操作と基本的には変わらない。放出される粒子(例えば W^+ 等)に対応する波の振幅は，結合定数に比例する。粒子を放出する確率は，その振幅の 2 乗だ。これは荷電粒子による光子の放出と変わらない。生じた電磁場，すなわち放出される光子の振幅は，粒子の電荷(結合定数)に比例し，その確率は結合定数の 2 乗に比例する。

アップ-ダウンと，チャーム-ストレンジの 2 種類の世代しかないとしよう。スピン 1 の荷電粒子，W^+ と W^- が引き起こすクォーク間の遷移を考える。これらの遷移は，厳密に同じ世代の中で起きると思うかもしれないが，実際には，そうではない。以前，アップクォークは W^+ を放出してダウンクォークになり，チャームクォークも W^+ を放出してストレンジクォークになると説明した。ダウン → アップ＋W という反対向きの遷移は，負のベクトルボソン W^- によって引き起こされる。これらの遷移の強さは，例えばニュートリノ→電子＋W^+ といったレプトンの場合と等しい。言い換えると，これらすべての相互作用における結合定数はすべて上記の g である。この結合定数の普遍性(ユニバーサリティ)は，理論的考察においては非常に大切な性質である。次の図に遷移振幅を示した。遷移振幅の大きさ L は，普遍的な結合定数 g に比例する。遷移確率 L^2 は，$\alpha_w = g^2/4\pi$ に比例する。



実際には，クォークの遷移において，少し世代間の回転が起きている。

$$\text{アップ} \longrightarrow \text{ダウン} + W^+$$

という遷移では，

$$\text{ニュートリノ} \longrightarrow \text{電子} + W^+$$

というレプトンの遷移よりも確率が若干小さくなる。だが，その差は，

$$\text{アップ} \longrightarrow \text{ストレンジ} + W^+$$

という新しい遷移が起こる確率と等しい。

これまでの話では，エネルギー保存則を考慮していない。事実上，反応を制限してしまうからである。例えばニュートリノは非常に軽いので，電子と W^+ とに崩壊することはできない。だが上の反応からクロッシングによって導かれる反応は，実際に起こりうる。実際に観測される

$$W^- \longrightarrow \text{反アップ} + \text{ダウン}, \quad W^- \longrightarrow \text{反アップ} + \text{ストレンジ}$$

という過程の全遷移確率を足し合わせると，

$$W^- \longrightarrow \text{反ニュートリノ} + \text{電子}$$

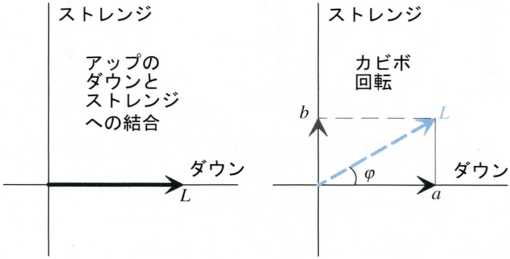
という反応の遷移確率と等しい。

同様に，

$$\text{チャーム} \longrightarrow \text{ストレンジ} + W^+, \quad \text{チャーム} \longrightarrow \text{ダウン} + W^+$$

という反応の遷移確率を足し合わせると，レプトンの遷移確率（$\nu \rightarrow e^- + W^+$）と等しくなる。これらの現象は L がカビボ角だけ回転した結果として生じる

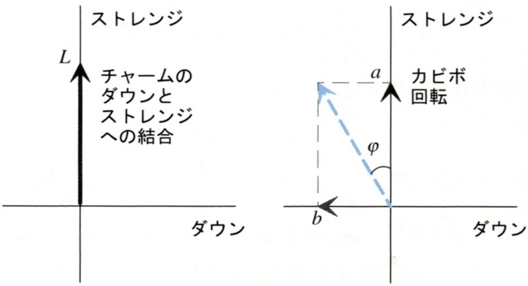
と見なすことができる。ではそのことを説明するために，左側の図について考えてみよう。



太い線はアップクォークからダウンクォーク，そしてアップクォークからストレンジクォーク(ただし W^+ も放出される)への結合定数を表している。太い線を横軸に射影したものが，ダウンクォークへの結合を，同様に縦軸に射影したものが，ストレンジクォークへの結合を表している。太い線が水平方向を向いているのは，ストレンジクォークの結合はゼロということだ。

ここで，太い線を角度 φ だけ回転させよう。この回転がカビボ回転である。水平方向への射影(a と表されている)は，回転前の元図(L と同じ長さ)よりも少しだけ短くなる。さらに，今度はストレンジクォークとの結合(b)も，ゼロではなくなる。

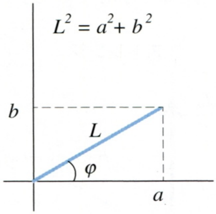
チャームクォークからダウンとストレンジクォークに遷移する場合の結合($+W^+$)も同様だ。これらを示すと下の 2 つの図のようになる。もともと，チャームからダウンへの結合は起こらない(太い線は垂直上向きなので，水平



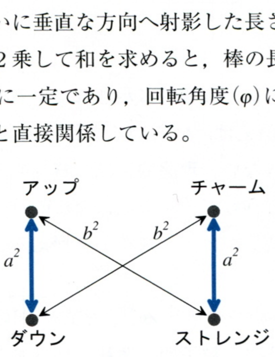
方向への射影は0)。だが，今度も同じ角度だけカビボ回転を行うと，この遷移の結合が b だけ生じる。同時に，チャームからストレンジクォークへの遷移は大きさ L から a に減少する。

実験で求められたカビボ角は，約 12.7 度である。角度という考え方は，ある反応確率が減少した分だけ新しい反応が起こることを意味するので，非常に実り多い。この考え方の出現とともに，今まで曖昧だった多くの実験結果が意味をもつようになった。1963 年，($d \to u$＋電子＋反ニュートリノという崩壊による)中性子崩壊における結合定数が，ミューオン崩壊($\mu \to \nu_\mu$＋電子＋反ニュートリノ)における結合定数よりも若干小さな値をとることが明らかになった。カビボ理論による説明は，こうして実験結果と完璧に一致した。

では，全確率(いろいろな終状態に行く確率の総和)の問題はどうだろうか。回転では，各成分の 2 乗の和は変化しない。したがって，全確率は変化しない。これは，有名なピタゴラスの定理の結果である。

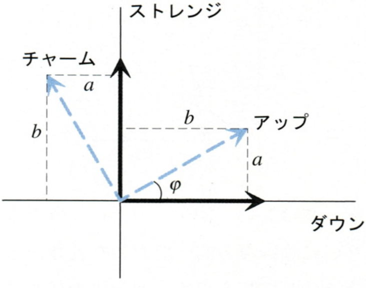


適当な長さの棒を考えてほしい。図中では，L に当たるとしよう。ピタゴラスの式を用いると，互いに垂直な方向へ射影した長さから，棒の長さが求められる。射影した成分を 2 乗して和を求めると，棒の長さはその平方根になっている。棒の長さ L は常に一定であり，回転角度(φ)に依存しない。また，それぞれの成分の 2 乗の和と直接関係している。



カビボ回転の効果を示すと図のようになる。回転前，アップがダウンに変わる確率はL^2（Lはミューオン崩壊で測ったLと等しい）だ。回転後，アップクォークがダウンクォークに変わる確率はa^2，ストレンジクォークに変わる確率はb^2であり，これらの和は常に等しい。つまり$a^2+b^2=L^2$の関係が成り立つ。同じことがチャームクォークについてもいえる。注意深い読者は，図中の矢印が両側向きになっていることに気づいたかもしれない。実際，図中には反対向きの遷移，例えばダウン→アップ＋W^-，も表してある。こうすれば図は上下反転に不変になる。つまり上下をひっくり返しても同じ形を保つ。カビボ回転は，これらの逆反応も考慮して，同じように議論することができる。

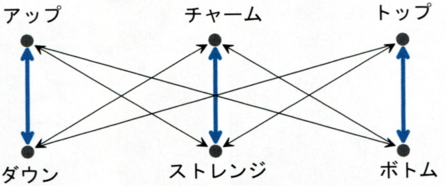
図示すると下のようになる。初めの状態では長さの等しい太い線が2本，直交している。カビボ回転によって，太い線は点線まで移動する。アップと書かれた点線から（ダウン軸とストレンジ軸へ）の射影は，アップクォークからダウンクォークとストレンジクォークへの遷移を表す。チャームクォークの場合も同様に，チャームと書かれた点線で示している。



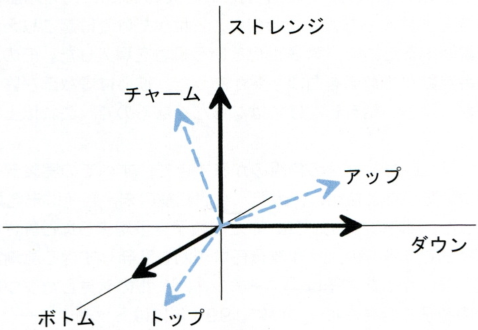
カビボ回転が正しいことは，実験的に示されている。だが，なぜ起こるのかは謎のままである。謎といえば，いろいろな粒子の質量と同様，12.7度というカビボ角の値も説明できない。理論的には，質量やカビボ角はヒッグス粒子と関係している。だが，どうしてそんな値になるのかはわからない。繰り返すが，将来的に新しい測定装置がヒッグス粒子を捉えることによって，理解が進むという希望はある。

3つの世代があるという点を考慮すると，実際の問題はさらに複雑になってくる。次の図に示したように，粒子間の遷移にはさまざまな種類がある。すべ

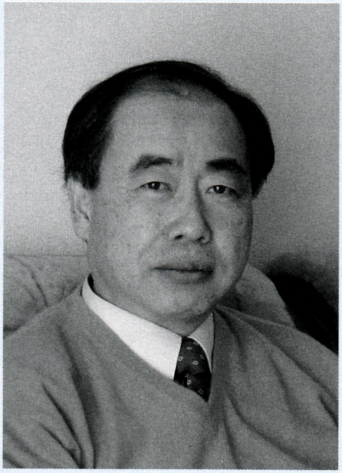
ての遷移を観測するには，多大な実験的努力が必要だが，まだ十分とはいいがたい。この図には，反対向きの遷移も描いてある。つまり両方に向いた矢印を用いることで，上下をひっくり返す反転に対して不変な図になっている。

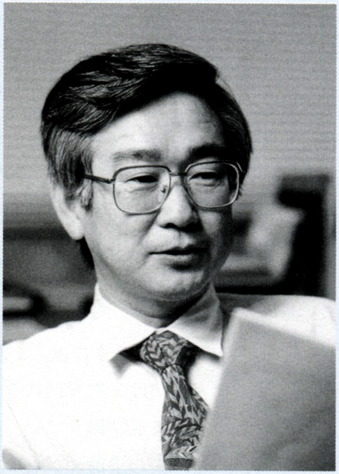


3 世代の場合の回転を表すには，3 番目の軸，つまりボトム軸が必要である。だから，回転を表す図は 3 次元的になる。視覚化すると下図のようになる。ボトム軸は紙面に垂直に飛び出している。回転はだいぶこみ入ってくる。チャーム軸は左に移動し，少し手前に(紙面から)飛び出してくる。さらに，アップとトップの面内における回転がある。



アップ，チャーム，トップと書いてある太い点線を，3 番目の軸の方向に射影したものが，アップ，チャーム，トップクォークがボトムクォークへ遷移するときの強さを表す。2 人の日本人物理学者，小林と益川は，カビボ回転を，互いに直交する 3 つの軸(太い線)の回転に一般化した(カビボ，小林，益川の頭文字にちなんで CKM 回転とよぶ)。なんと彼らは，当時，第 3 世代の存在すら知らなかったにもかかわらず，このような卓越した考えを思いついたのだ。ある深淵な議論に基づいて，彼らは第 3 世代の存在を予言した。では，CKM





小林　誠(Makoto Kobayashi, 1944) と **益川英敏**(Toshihide Maskawa, 1940)。1973 年，小林と益川の 2 人は，カビボ混合の考え方を 3 世代の場合に発展させた。第 3 世代が存在する兆候すらなかった時代に，2 世代だけでは起こりえないはずの現象が起きることを説明するために，第 3 世代という概念を導入した。その現象が起こるためには，ある結合定数が虚数部をもつ必要があった。彼らは虚数部が許されるための条件を調べたのだが，詳しい話をしなければならなくなるので，これ以上ふれないでおこう。

ともかく，2 世代だけだと理論の枠組みが狭すぎて，すべての実験データを説明できないことに気がついた小林と益川は，大胆な発想転換の末，当時は未発見だった第 3 世代の存在を予測した。当時の雰囲気では，新たな粒子を予測するなど許されないことだった。一転して，今日では多くの人々が無責任な予測を乱発しすぎる風潮があるけれど。第 3 世代で最初に見つかった粒子は，マーチン・パールの発見したタウ粒子だ。続いて第 3 世代のほかの粒子も発見され，ついに 1995 年にはトップクォークが確認された。

だが，それだけではない。複素数の結合定数を測定して理解するための実験が，精力的に行われている。スラックにある B ファクトリー†(ボトムクォークの束縛状態を大量につくるための加速器)は大変順調に稼働しており，新たな情報を提供しつづけている。実は，複素数の結合定数の謎も，ヒッグス粒子に結びついていくのだ！

† (訳者注)日本の高エネルギー加速器研究機構に建設された B ファクトリーは，スラックに半年遅れて完成したにもかかわらず，瞬く間にスラックを凌ぐすばらしい成果をあげ，小林・益川理論を検証した。日本の加速器および実験技術の水準の高さを証明したものといえよう。

回転のある側面についてしばらく議論することにしよう。深入りする必要はないのだが，事実は述べておかねばならない。次の2段落は，飛ばしてもらってもかまわない。

3次元における回転は，3つの角度を用いて記述できる。まず，チャーム軸を左に回転することができるし，次に手前に回転することもできる。また，チャーム軸を固定して，アップ-トップ平面内で回転することができる。つまり，CKM 回転には3つの角度が関係している。そのひとつがカビボ角だ。ここからは量子力学特有の話になるが，量子力学では，結合定数は正・負どちらかの値だけをとるわけではない。虚数部をもつ複素数でもかまわない。読者が複素数や虚数を知らなければ，残念ながら，単純に説明することはできない。もっとも近い例は交流電流だ。交流電流では，正負は意味をもたない(ただし，瞬間的には意味をもつ)。だが，2つの電流を比べることはできる。同じ方向を向いていることもあるし，反対向きのこともある。さらによくあるのは，お互いに位相がずれている場合である。位相は複素数でも表せる。

実際，CKM 回転では，4番目の角度が現れる。この角度は，結合定数の相対的な位相を決定する。CP 対称性の破れとよばれる現象と関連した方法を用いれば，この角度を実際に測定できる。だが本書の狙いは，その点を詳細に説明することではない。

ここで，Z^0 との相互作用においても，W との相互作用における回転と類似した混合が見られるかどうか気にならないだろうか。先ほど出てきた図では，例えばダウンクォークと Z^0 の相互作用は，

$$\text{ダウン} \longrightarrow \text{ダウン} + Z^0$$

と表される。

だが，異なる世代の素粒子が混じることはないのだろうか。例えば

$$\text{ダウン} \longrightarrow \text{ストレンジ} + Z^0$$

のような相互作用があってもよいのではないか。

しかしながら，そんなことは起こらない。非常に高精度な実験において，そのような遷移が起こらないことが確かめられている。この事実は，かつて理論家の間に混乱を巻き起こした。だが現在では，この現象は理論的に解明されて

いる。詳しくは第9章を見てほしい。このような反応が起こらない理由を，物理学者に説明させると，「ストレンジネスを変化させる中性カレントが存在しないから」というだろう。中性というのは，つまり Z^0 の電荷だ。ダウンクォークからストレンジクォークへの変化は，ストレンジネスの変化として説明されている。カレントという言葉は，Z^0 がクォークと相互作用する仕方を述べたものだ。

3.5　ニュートリノ混合

3世代のレプトン間にはなぜ混合が起こらないのだろう，と思うかもしれない。その質問には，混合しているかどうかはわからない，としか答えられない。理論的には，ニュートリノ質量がすべて0のときにレプトン間の混合を観測することはできない。現時点で，実験結果からわかっているのは，ニュートリノ質量の上限だけである[†]。それらのニュートリノ質量について，理論的にいえることは何もない。ニュートリノに質量があれば，ニュートリノにもCKM混合のようなことが起こる。今この瞬間も，ニュートリノ質量を調べるために多大な実験的努力が続けられている。ここでは，単純化した話をしよう。

太陽の中でニュートリノを放出する反応を考えてみよう。そのような場合には，常に

$$\text{電子} \longrightarrow \text{ニュートリノ} + W^-$$

あるいはこれをクロッシングした反応が起こっている。

太陽ニュートリノ実験の目的は，そのような反応から生まれたニュートリノ検出である。混合が起こらないかぎり，出てくるニュートリノは常に電子ニュートリノである。混合が起こる場合には，電子ニュートリノ，ミューオンニュートリノ，タウニュートリノが混合したものになっているはずである。それらのニュートリノが引き起こす反応を吟味すれば，どのニュートリノが出現したのか実際に観測できるはずである。簡単に書いているが，実験的には，容易なこ

† （訳者注）電子ニュートリノとミューオンニュートリノの混合は，片山泰久・松本賢一・田中正・山田英二および牧二郎・中川昌美・坂田昌一によって提唱された。牧・中川・坂田はさらにニュートリノ振動も予言した。

とではない。だが現時点における観測結果は，混合が起きていることを示唆しているようだ。詳細な実験結果が出るまで，しばらく待たなければいけない†。太陽ニュートリノ実験は，実験者が制御できる範囲が限られた部類の実験に入る。だから，反論の余地のない証拠を得るには，加速器実験の実施を待つしかない。すでに，いくつかの加速器が建設されている。

なぜ質量が重要なのだろうか。これまで述べたような反応で，ニュートリノがつくられるとしよう。測定する側は，まさに検出器の中で逆向きの反応を探していることになる。混合はつくるときでも測定するときでも変わらないので，混合したニュートリノが検出器の中で反応して出てくるのは，やはり電子であろう。つまり，混合が起っているかどうか決してわからないように思われる。

だが，ニュートリノはつくられてから検出されるまでの間に，例えば，太陽から地球までの距離を飛んでくる。ニュートリノは一定のエネルギーをもつけれど，電子ニュートリノとミューオンニュートリノ(またはタウニュートリノ)の質量が異なるとすれば，飛ぶ速度が若干異なるはずだ。つまり，飛んでいる間にニュートリノ混合の仕方が変わってしまうので，検出されるときには，つくられるときとは違った混合の仕方になるということだ。

上の議論は非常に単純化したものである。つくられる所から検出される所までの距離とニュートリノの質量とが，ニュートリノを検出する際に重要であることを示唆するにすぎない。実際の量子力学では，粒子が飛んでいく様子は，波の伝わり方と密接に関係しており，その点が重要な役割を果たしている。だが，この議論にも多くの真実が含まれていることは間違いない。

3.6 粒子混合

粒子混合という奇妙な現象は，量子力学特有の効果である。この点について，しばらく論じよう。

---

† (訳者注)東京大学宇宙線研究所のスーパーカミオカンデや東北大学のカムランドなどの実験により，ニュートリノ振動が観測され，3種類のニュートリノの質量差が測定された。スーパーカミオカンデは太陽からの電子ニュートリノおよび地球大気圏上層部で作られるミューオンニュートリノがほかの種類のニュートリノに変わるのを確かめた。カムランドは原子力発電所でつくられる電子ニュートリノがほかの種類に変化するのを確かめた。

粒子混合過程の結果だと考えられているカビボ混合を例にとろう。トップクォークとボトムクォークのことは，しばらく忘れて，まず始めに，回転が起きる前の状態を考えよう。このとき，アップクォークはダウンクォークにだけ崩壊し，チャームクォークはストレンジクォークにだけ崩壊する。

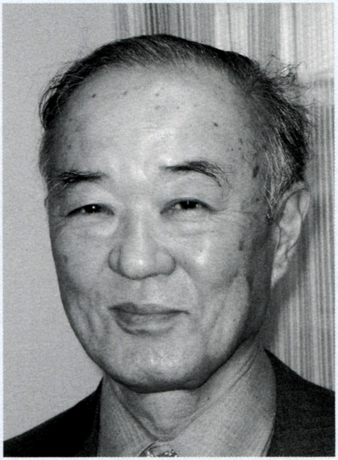
次に，新たな相互作用のために，ストレンジクォークがダウンクォークに，あるいは，ダウンクォークがストレンジクォークに変化するとしよう。このようなことが起こる可能性はきわめて高い。素粒子の変化が，3個の素粒子間(例えば，アップ → ダウン$+W^+$)でしか起こらない理由はないからだ。実際，4個の素粒子，あるいは2個の素粒子，さらには1個の素粒子だけが関係する遷移があっても不思議ではない。最後のひとつ，つまり関係する素粒子が1個しかない遷移は，実に奇妙だ。まるで，ある粒子が存在するのをやめてしまうようにみえる。エネルギーが保存されることを考慮すると，その粒子は，始めからエネルギーをもたないことになる。だが場合によっては，そんなこともありうる。話を戻して，ダウン→ストレンジ や ストレンジ→ダウン といった，2粒子の遷移に移ろう。この遷移がある強さで起きるとしよう。どうして異なった質量の素粒子が互いに移りあうことができるのか，気になる読者もいるかもしれない。実際，とても短い時間以外では，そのようなことは決して起こらない。この点については第9章の素粒子理論の項で議論する。今のところは脇においておこう。

アップ→ダウン$+W^+$の過程に戻ろう。この過程において，ダウンクォークがストレンジクォークに変わっているかもしれない。だとすれば，アップ→ストレンジ$+W^+$という崩壊が観測できる可能性が出てくるのだが，まさにこの過程が，カビボ回転を引き起こす起源だと考えられている。ストレンジクォークが再びダウンクォークに戻ることもあるので，状況は少々複雑になる。いろいろな可能性を考えに入れて，最終的に何が起きるのかを調べるのは理論家の仕事だ。一連のすべての遷移を考慮しなければいけない。

この問題を解く鍵は，ダウンクォークとストレンジクォークの特別な組み合わせが2つあって，一連の遷移によっても変わらないことである。これらの特殊な組み合わせを，大文字のDクォーク，Sクォークとよぼう[†]。まず始めに

---

† (訳者注)これと区別するために，もともとのダウンクォークとストレンジクォークを，dクォーク，sクォークとよぶことにする。

西島和彦(Kazuhiko Nishijima, 1926)と**アブラハム・パイス**(Abraham Pais, 1918-2000)。まえがきにあげた本の著者であるパイスは，非常に教養のある物理学者だ。彼は，ゲルマンとともに粒子混合のアイデアを導入する論文を書いている。K^0-$\overline{K}^0$ 混合に関するものだが，この系は実におもしろい。K^0 をつくってしばらくすると $\overline{K}^0$ に変わるし，その逆も起こるのである。その結果，粒子混合が起こって，K_S と K_L という 2 つの組み合わせができる。この 2 つは非常に異なった性質をもつ。K_S がすぐに崩壊してしまうのに対し，K_L はずっと長生きである。

随伴生成という考えを導入したのもパイスである。実は，この考えは，新しい量子数の存在への道を拓くものだった。後にストレンジネスとよばれるようになったこの量子数は，弱い相互作用以外では，必ず保存される。西島をはじめとする日本の物理学者が，同じような考えを提案した。この保存則を使えば，ある種の粒子が，ストレンジネス＋1 と－1 をもつ粒子の対でしか生成されない理由が説明できる。

西島は(ゲルマンと同じ頃)ストレンジネスという概念を導入し，ストレンジネスをもつ粒子をアイソスピンによって分類した。ゲルマン-西島の法則は，その後の素粒子論の発展において，非常に重要な役割を演じたのである。

ユダヤ人のパイスは，第 2 次世界大戦中オランダに住んでいた。かろうじて生き延びた彼は，戦争が終わる直前に，非常に勇敢な女性の働きかけのおかげで，刑務所から解放された。彼女の武器はクラマースがハイゼンベルク(彼は取りなしてくれなかった)に宛てた手紙だった。釈放してくれたナチス高官は，おそらく戦争が終わりに近いことを予感していたのだろう。まれに見る寛大さだ。一緒に捕まったパイスの友人は射殺された。

Dクォークだが，これはdクォークとsクォークからできている。Dクォーク中のdクォークがsクォークに変わる一方，(Dクォーク中の) sクォークもdクォークに変わる。このような変化が次々に起こって，最終的な効果はゼロになると考えるとよい。つまり，Dクォーク内におけるsクォークの割合は変化しない。

おおざっぱな例をあげよう。衣装道楽のA氏という人物がいる。彼は着替えの名手で，とてもすばやく着替えられる。彼は洋服を2着もっていることにしよう。赤い服と緑の服だ。もう1名，B氏にも登場してもらおう。彼もすばやく着替える名人だ。B氏のほうは，とにかくA氏とは違う色に着替えるとする。A氏が赤から緑に着替えたら，B氏は緑色を脱ぎ捨てて赤色を着る。

彼らが，目にもとまらぬ速さで着替えるとしたら，我々に見えるのは，赤と緑が混ざった色の服を着た2名の人物である。実際に見える色は，A氏が緑と赤を着ている時間の割合によって変わる。A氏が，ある決まった一瞬，例えば4ミリ秒の間は赤い服を，そして緑の服を2ミリ秒，という割合で着替えるとすれば，彼は，オレンジっぽい色の服を着ているように見えるだろう。一方，B氏は緑の服を着ている時間のほうが長いので，レモン色っぽく見えるはずである。言い換えると，我々に見えるのは，お互いに補色関係にある服を着た2人だ。どんな色合いに見えるかは，それぞれの服を着ている時間の割合に応じて決まる。

DクォークとSクォークは，このたとえ話の補色と同じように，お互いに相補的な組み合わせである。たとえ話において，実際に見える服の色は赤や緑ではなく両者の混合色だったように，実験で見つかるのはdクォークやsクォークではなく，DクォークとSクォークである。粒子間の遷移が可能な場合にはいつでも，この2種類の粒子が混合した状態が現れる。混合がまるで起こらない例には，アップクォークとダウンクォークがある。これらは，量子数保存によって，混合が禁止されている。しかし一般的には，2種類の素粒子の量子数(スピンも含める)が同じなら，お互いに混合する。例えば，原理的には，アップクォークはチャームクォークと混合できる。しかし，ダウン-ストレンジの混合効果と区別できないため，この効果だけを単独で観測することはできない。カビボ混合は，ダウン-ストレンジ混合で起きると考えてもよいし，アップ-チャーム混合で起きると考えてもよい。あるいはそれら両方の混合によって起

きると考えることもできる。いずれにしても，最終的には，同じカビボ混合になる。だからこそ，先ほどの文中において図の反転(上下の反転)に対する不変性を強調したのだ。前の図に示したCKM回転では，座標軸を固定して太い線を回転してもよいし，あるいは太い線を固定して細い線で示す座標軸を逆向きに回転してもよい。物理学者は，アップ-チャームを固定して，ダウンとストレンジを混合するという決まりごとを選んだ。

理論的には，これまで説明してきたクォーク混合はヒッグス粒子によって起こると考えられている。ヒッグス粒子がクォークと相互作用することで，このような混合が起こるわけである。ほかの相互作用は，決して粒子間の混合を起こさない。もちろん，これは説明にはならない。CKM回転の謎をヒッグス相互作用の神秘に置き換えただけである。理論とよぶためには，不思議なヒッグス粒子まで含んだ，特定の理論構成でなければならない。もちろん，その理論は間違っているかもしれない。だから「理論的には」という言葉は，「簡単に説明することはできないし，間違っている可能性を含んでいる」という意味だと思ってほしい。

粒子混合の別の例として，光子とZ^0をあげよう。光子とZ^0は量子数が等しく，ある種の混合が起きた結果として生じる。このとき現れるもうひとつの角度を，弱い混合角とよぶ。この角度は，弱い相互作用と電磁相互作用の混合を表す。Z^0はニュートリノとも相互作用する。光子はニュートリノとは相互作用しない。ニュートリノは電気をもたないので当然である。このとき，潜在的な問題を解決するのが，粒子混合である。つまり，光子というのは，ちょうどニュートリノと相互作用しないような組み合わせなのである。混合が生み出すおかしな効果のひとつがこれである。2個の粒子それぞれは，決まった粒子と相互作用するが，2個が混合した特定の組み合わせになると，その粒子と相互作用しなくなる。可能だった相互作用がちょうど打ち消しあうのだ。明らかに，電磁相互作用とヒッグス相互作用には繋がりがあるようだ。ヒッグス粒子のかげには，たくさんの謎が潜んでいる。

理論的には，CKM混合の主役はヒッグス粒子のはずである。もちろん，ほかの相互作用も重要な役割を果たしているには違いないが。実験で得られた実際の混合から，ヒッグス粒子とその相互作用についての重要な結論が導き出せる。カビボ角を測定するには，

$$\text{アップ} \longrightarrow \text{ダウン} + W^+ \quad \text{と} \quad \text{ニュートリノ} \longrightarrow \text{電子} + W^+$$

の2つの過程(とクロッシングしたもの)を比べればよい。

同じように弱い混合角を調べるには，

$$\text{アップ} \longrightarrow \text{ダウン} + W^+ \quad \text{と} \quad \text{アップ} \longrightarrow \text{アップ} + Z^0$$

を比べればよい。混合が起きなければ，両方の過程の相互作用は同じ強さになる。これらの相互作用の強さを測定すれば，弱い混合角の値がわかる。

前の章で，「対角型」のグルーオンについて少しふれた。グルーオンは2つの色をもつが，一方の色がもう片方の反色になっているのが対角型グルーオンだ(例えば，赤／反赤グルーオン)。これらは混合することもある。赤／反赤グルーオンは量子数保存則を破らずに，緑／反緑グルーオン，あるいは青／反青グルーオンに変化する。だから，実際に飛んでいるグルーオンは，これらが混合した組み合わせである。そのような組み合わせの中には，最終的には，どの粒子とも相互作用しないものもある(白いグルーオンとでもよべばよいだろうか)。だが，なんらかの反応に関与しないかぎり，我々にとっては，存在しないのと同じことだ。白いグルーオンに意味をもたせるためには，現在のクォーク-グルーオン結合に加えて，新しい相互作用を導入しなければいけない。

4 エネルギー，運動量，マスシェル

4.1 序　論

本章では，この先の議論で必要となる基本的事項，つまり素粒子の力学的性質について説明しよう。特に運動量とエネルギー，マスシェル関係についてしっかりと理解しておいてほしい。1粒子の場合における運動量とエネルギーの関係のことを，マスシェル関係とよぶ。次の2つの理由から，エネルギーと運動量は重要な概念である。まず量子力学では，この2つの量を指定すると自由粒子1個の状態(ただし，スピンや電荷などの内的な性質は除く)が完璧に記述できる。そして，エネルギーと運動量はどちらも保存されることである。すべての観測可能な過程において，始状態のエネルギーは終状態のエネルギーと等しい。分布や形が変化することはあっても，エネルギーが消失することはない。ストーブで薪を燃やすとしよう。このとき，薪中の化学エネルギーが熱にかわって部屋を暖める。得られた熱は，最終的には外に出ていってしまうけれど，消えてしまうわけではない。これがエネルギー保存則である。同じような法則が運動量についても成り立っている。本節では，簡単な衝突過程における運動量保存則についても説明するつもりである。

量子力学の真髄は，粒子の状態がエネルギーと運動量を用いれば完全に描写できるという事実にある。粒子の状態を知るためには，ニュートン力学では，ある時刻におけるその粒子の位置と運動量，つまり，いつ，どこで，どのように動くかさえわかればよい。運動量[a]はベクトルなので，方向をもつ。つまり x,

[a] 光速に比べて遅いときには，速度に質量を掛けたものが運動量だということを思い出そう。

y，z 方向の3つの成分に分解できる。つまり，粒子の状態を特定するために，空間座標，時間，運動量の3つの成分が必要なわけだ。量子力学では，正確な運動量がわかっている場合に，その粒子の位置を知ることはできない。ハイゼンベルクの有名な不確定性関係が禁止しているのである。この式は，位置の不確定さと運動量の不確定さの積は，ある一定の数よりも大きいことを意味している。片方の不確定さが小さいということは，もう片方の不確定さが大きいということである。時間とエネルギーの間にも似たような関係が成り立っている。正確な運動量が(したがってエネルギーも)わかっているときには，もうそれ以上は何も(位置も)わからないということだ。ある粒子がいつ，どこにいるかが知りたくても，宇宙のあらゆる場所，あらゆる時刻において存在する確率はすべて等しいのでわからない。量子力学とは，そういうものなのである。粒子がどこかに存在する確率を計算するには，波を使う必要がある。つまり，正確な運動量をもつ粒子は平面波，つまり空間全体に一様に広がっている波に対応する。平面波とは，比較的穏やかな海面上で水平線の向こうまで続く波のようなもので，とても不思議な代物である。日常経験とかけ離れているので，理解しづらいだろう。我々が住むマクロな世界で，誰もが体験できることについて説明することは簡単である。しかし，ミクロの粒子は必ずしも我々の常識どおりには振る舞ってはくれない。そのような量子の世界に，マクロ世界と同じ性質があれば大切にしなければならない。エネルギー保存則と運動量保存則は，そういった大切な性質の典型である。量子力学の難しさにうまく向き合うこつは，知りうること，わかることについてのみ議論し，知りえないことについては議論しないことだ。粒子の位置を知ることができないのなら，そのことについて語ってはいけない。

もちろん，運動量を厳密に知ることは不可能だ。粒子の位置もおおざっぱにしかわからない。素粒子加速器の中では，たくさんの粒子がビームとなって飛んでいる。測定を行うときには，一定の時間だけビームを加速器から取り出す。そのため，取り出される粒子の位置はおおよそ定まっている。だがミクロ世界のスケールから見れば，このときの位置の精度はとてもおおざっぱである。だからエネルギーと運動量だけを使って粒子を記述するのは，確かに理想化ではあるが，我々の目的にとっては十分現実的である。素粒子にとって，ビームは全宇宙と同じくらい大きいのだ。大きさの目安になれば幸いだが，現代の加速

器では，素粒子を約 100 GeV まで加速する。エネルギーの不確定さを 1% とすると，量子力学では，原子核の大きさの 10 分の 1 以内の精度で，粒子の位置が確定できる。おおざっぱにいって，原子の大きさは原子核の 10 万倍だ。原子 1 億個が集まって，ようやく 1 cm の長さになる。

本章で述べる事柄は，エネルギーと運動量，保存則とマスシェル関係である。特に 2 個以上の粒子の衝突について詳述するつもりだ。終状態の粒子の種類が，始状態とまったく変わらないことがある。それでも運動量が異なるので違う方向に飛んでいく。このような場合を弾性衝突とよぶ。一方，衝突の始状態に存在した粒子が消失し，終状態にはまったく異なる粒子が生じる場合がある。これが非弾性衝突だ。弾性衝突でも非弾性衝突でも，2 つの保存則は同じように成り立つ。だが，非弾性衝突の場合には違うところがある。始めの粒子が消滅して，終状態には新しい粒子が出現する(いくつかは，始状態と同じものかもしれない)のである。消滅した粒子と，新たにつくられた粒子の質量は，異なるかもしれない。その場合，衝突前の質量の合計と衝突後の質量の合計は一致しない。アインシュタインによれば，質量はエネルギーだ($E = mc^2$)。質量に差があるということは，エネルギーにも差があるということである。エネルギーの収支を考えるときには，その点に注意しておかないといけない。ここでは先走るのはやめて，少し体系的に考えていこう。混乱を避けるために書いておくが，物理学で粒子の質量というときには粒子が静止しているときの質量を意味している。粒子が走っているときの見かけの質量ではない。

4.2 保存則

素粒子というと，空中を飛ぶ小さな弾丸のような物体を思い浮かべる人が多いかもしれない。だが素粒子は，どちらかというとビリヤード球やスヌーカー球に似ている。といってもビリヤード球とスヌーカー球はかなり違う。ビリヤード球のほうが重い。しかも，スピン(回転)がかけられる。スピンのかかったビリヤード球は台上をあまり転がらずに滑っていく。スピンがかかると，動きはとても複雑になる。一般に，素粒子にはスピンがあるので，スヌーカー球よりはビリヤード球に近い。しかし，素粒子の衝突が複雑な理由は，それだけではない。衝突後に出てくる粒子が，もともとあった粒子とまったく違うことがあ

るのだ。十分に高エネルギーの陽子どうしが衝突すると，陽子よりも軽い粒子や重い粒子がたくさんできることがある。終状態の粒子が，始状態と同じ粒子の場合を弾性衝突とよぶと前に述べた。球が壊れないかぎり，ビリヤード球どうしの衝突は弾性衝突である。

これまで述べてきたのはおおまかな全体像である。正確には，素粒子はもっと全体的にぼやけた物体と考えたほうがいいかもしれない。量子力学では位置や運動量が確実にはわからないからである。素粒子が衝突するときには，保存則が成り立つ。マクロな物体の衝突に対して同じように成り立つ保存則もある。どんな物体も素粒子からできているからである。そのような法則が我々にとってなじみ深いのは，日常生活で成り立つことをすでに知っているからだ。

もっとも重要な保存量はエネルギーである。どのような場合でも，衝突前と衝突後のエネルギーは等しい。さらに運動量保存則もある。ほかにも(電荷などの)保存則はいくつかあるが，本章では言及しない。ただしマクロな世界ではまったく知られていない性質についても，保存則が存在する可能性があることは知っておいてほしい。このような保存則は，いろいろな衝突過程を観測して，なんらかの規則性を見いだそうと努力する作業を通じて発見される。粒子の速度が遅いとき，運動量は速度に質量を掛けたものとなる。この関係は，速度が大きくなると複雑さを増す。速度が光速に近づくと運動量は無限大になるのである。この場合には，明らかに速度は保存されない。静止しているビリヤード球に，例えば豆粒のような小さな物体をぶつけてみよう。衝突後のビリヤード球は，衝突前の豆粒よりもはるかにゆっくりと動く。そして，衝突前の豆粒と同じ方向に進むだろう。ビリヤード球は豆粒よりもずっと重いので，豆粒からビリヤード球に移ったエネルギーの効果は，問題にならないほど小さい。このように，保存則を探す場合には，必ず質量を考慮しなければならない。だからこそ質量と速度の積，つまり運動量を考慮していくのだ。最終的には，豆粒はビリヤード球の表面にへばり付くことになるだろう。球の速度は，豆と球の質量の比だけ遅くなるけれど，進む方向は豆と同じだろう。

ここでもっとも重要なのは，**どのような物体でも，特に素粒子では，運動量とエネルギーは独立ではない**ということだ。**ある質量をもった粒子の運動量がわかれば，速度とエネルギーもわかる**のである。本章の主要テーマはこの点である。では，運動量とエネルギーの関係について，もう少し詳細に見ていこう。

相対性理論では,質量をもたない粒子も任意のエネルギーをもつことができる。例えば,光子(おそらくニュートリノも)には質量がない。質量のない粒子にとっても,先ほどの関係は変わらない。つまり運動量がわかればエネルギーもわかる。

学生時代に習ったこの式を覚えている方もいるかもしれない。粒子の速度が v なら,運動量(p)は mv になる。運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$,運動量を用いて表すと $\frac{1}{2}p^2/m$ である。粒子の速度が光速に近づくと,この関係は変化する。つまり,相対論の効果が重要になってくる[b]。常に光速で動いている質量のない粒子に対しては,エネルギーは運動量に光速 c を掛けたものになる。速度には方向があり,3つの成分(x,y,z 方向)に分けられる。運動量にも同じように3成分がある。速度や運動量をベクトルとよぶ。速度と運動量の関係はベクトル的なものである。この関係は x,y,z のどの成分においても成り立つ。x 方向の運動量は,x 方向の速度にその粒子の質量を掛け合わせたものである。運動量の3成分がそれぞれ保存されるのだから,保存則も3種類あることになる。運動量保存則は,3次元ベクトルの保存則である。つまり,今までは1つの保存則のように話してしてきたが,実際には3つの保存則があるということだ。非相対論的には,全エネルギー(質量エネルギーは含めない)は,速度3成分それぞれに対する運動エネルギーの総和なので,$\frac{1}{2}m{v_x}^2$ と $\frac{1}{2}m{v_y}^2$ それに $\frac{1}{2}m{v_z}^2$ の和になる。

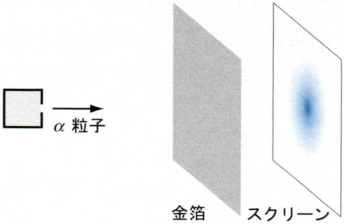
2種類の粒子A,Bが弾性衝突する場合を考えてみよう。陽子と電子の散乱,言い換えると,陽子の電場によって電子が散乱される場合を想像してほしい。静止している粒子Bに,粒子Aがある速度で飛んできて,角度 φ で去っていく(図を参照)。



b 質量エネルギー mc^2 も含み,どんな速度の場合にも使うことができる厳密な式は $E=\sqrt{p^2c^2+m^2c^4}$ である。

粒子Bが粒子Aよりもはるかに重いとすると，衝突後もBはほとんど動かない。出ていく角度φの値は，衝突の仕方によって変わってくる。ビリヤード球の場合，角度φの値は球のどことどこが衝突したかで変わる。素粒子の衝突では，位置を精密に測定することができないので，粒子のどの部分が衝突したのかはわからない。加速器では，同じ種類の粒子のビームがつくられ，たくさんの粒子が，ある広がりをもって同じ方向に走っている。このビームの広がりは，ぶつけようとしている物体(標的にしている物質の原子核)の大きさよりも，はるかに大きい。だから数多くの衝突が観測できる。そうすればいろいろな方向に飛び出していく粒子の数がわかる。小さな角度で出てくる粒子もあれば，大きな角度で出てくる粒子もあるだろう。ある角度の方向に，どのくらいの個数の粒子がやってくるかは，衝突の仕方や粒子間の相互作用によって変わる。素粒子物理学では，角度分布を調べて，素粒子間の相互作用の性質を導き出す。角度分布とは，衝突によって生まれた粒子が，いろいろな方向に飛び出していく数の分布のことである。ビームを当てている間に，例えば10°の方向に何個，20°の方向には何個飛んできた，というように数えていけばよい。

このような角度分布の測定は，マンチェスター大学(英国)におけるラザフォード達の歴史的な実験から始まった。α粒子(陽子2個と中性子2個からなるヘリウム核)を放出する放射線源を，小さな穴が1個開いた箱の中に置いた。穴を通過したα粒子は，薄い金箔を通り抜けてスクリーンに衝突する。スクリーン上にできた像は，中心部ほど濃く，外側に行くにしたがって薄くなる。



この説明と図は，元の実験とまったく同じではない。もともとの実験では，金箔を完全に覆うようにたくさんのスクリーンを用いていた。だが，どちらにせよ角度分布は測定できる。ラザフォードを驚かせたのは，跳ね返されて後ろ向きに飛んでいく粒子の存在である。金の原子核はα粒子の約50倍も重いの

で，そういったことが起こる。ビリヤード球に跳ね返される卓球の球と同じようなものだ。

このような後方散乱について，ラザフォード自身は「私の一生でもっとも信じがたい出来事だった。15インチの砲弾をティッシュペーパーに向けて撃ったら，跳ね返されてきて自分に当たるようなものだった」と書き残している。当時，2個の荷電粒子間にはたらく電気的な力に関するクーロン則は，すでに知られていた。この法則では，距離が大きくなればなるほど，電気的な力は弱くなる。

正確には，クーロン則によると，力は距離の2乗に反比例する。だから，一定距離離れた粒子どうしが互いに引き合ったり反発しあうとき，距離が2倍になれば力は4分の1になる。反対に，距離が半分に縮まれば力は4倍になる。

重い荷電粒子に衝突して，軽い荷電粒子が散乱する場合を考えよう。散乱する角度は，軽い粒子が重い粒子に近づいたときの距離に大きく依存する。遠いところを通り抜ける場合には，あまり曲がらないけれども，重い粒子に近づけば近づくほど大きく曲がる。ラザフォード実験では，α粒子の方向がしっかり揃っていなかった。また，原子の大きさよりも広い範囲に均等に広がっていた。角度分布は，距離に依存した力の強さを反映している。

1911年に，ラザフォードは薄い金属箔（例えば金箔）にα粒子を当てて，散乱したα粒子の角度分布を調べた。そして，α粒子と原子核（双方が電荷をもつ）の相互作用がクーロンの法則に従うことを導き出した。電子の7500倍近く重いα粒子にとって，金属箔中の電子など問題ではなく，原子核しか「見えない」。一方，金箔中の原子核はα粒子の約50倍重いので，衝突後も原子核はほとんど動かない。

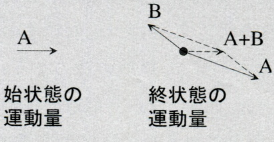
この実験から，原子は中心部に（重い）原子核があるだけで，ほとんど空洞だということが明らかになった。大部分のα粒子は衝突を起こさず，そのまま通り過ぎたようだった。だが，方向が変わった粒子の角度の中には，非常に大きなものがあった。角度が大きくなるのは，入射粒子の何倍も重い標的粒子に衝突した場合である。ビリヤード球が，卓球の球のように軽い物体に衝突しても，それほど進路が逸れることはない。だが，卓球の球がビリヤード球に衝突すると大きく曲がる。ラザフォードは，原子核は大変重く，原子の10万分の1よ

り小さいと結論づけた。この実験は，当時もっとも画期的な実験のひとつで，1913年に定式化されたボーアの原子モデルへの道を拓くものだった。ボーアはその少し前，しばらくラザフォードの研究室にいた。

前の例に戻ろう。静止状態の粒子Bに粒子Aが衝突した場合だ。粒子Aの質量がわかれば，初速度から，始状態の運動量が計算できる(静止状態にある粒子Bの運動量は0)。粒子Aが，ある速度で，ある角度で出てくると仮定する。そうすれば，粒子Aの終状態における運動量が求められる。さらに，運動量保存則によって粒子Bの運動量を求めることもできる。粒子Bの運動量と，粒子Aの運動量と組み合わせると，始状態における全運動量に等しくなるはずだ。つまり，粒子Aの速さと角度がわかれば，運動量保存則を用いて，粒子Bの運動量を計算することができる。

ここで少々厄介なことがある。確かに，我々は始状態の全エネルギーを計算することができる。終状態の粒子は，始状態の粒子と同じなので，それらの質量エネルギーは衝突の前後で等しく，考慮しなくてもよい。だから質量エネルギー(静止状態の粒子がもつエネルギー)を無視すれば，始状態のエネルギーは，つまり粒子Aの運動エネルギーとなる。これは，衝突後に出てくる2次的な粒子の運動エネルギーの総和と等しいはずである。だが，これまで仮定してきた状況では，一般にはそうはならない。粒子Aが勝手に決まった速度で飛び出してくると仮定していたからである。実際には，出ていく粒子Aの速度(角度は一定にしておく)が特定の値をとるときだけ，終状態の粒子AとBのもつエネルギーが，始状態のエネルギーと等しくなる。つまり，運動量の方向を決めておけば，エネルギー保存のおかげで運動量の大きさがわかる。

下に，運動量保存則を図示した。ただしエネルギー保存則は入れていない。矢印は粒子の運動量を表す。粒子AとBは，ほぼ反対向きの大きな運動量をもっている。それらを組み合わせると小さくなって，始状態の運動量に等しくなる(2つの運動量を組み合わせるということは，ベクトルの和をつくることになるので，AとBの運動量を2辺とする平行四辺形の対角線に相当する)。

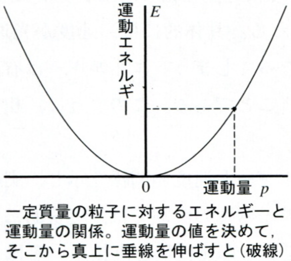


図からわかるように，AとBの運動量は始状態のAの運動量より大きい(運動量の大きさは矢印の長さで表す)ので，終状態のAとBのエネルギーは始状態のAのエネルギーよりも大きい。明らかにエネルギーの保存則が破れている，なぜなら，それぞれの粒子のエネルギー，したがって2粒子のエネルギーの和も，始状態のエネルギーより大きいからである。

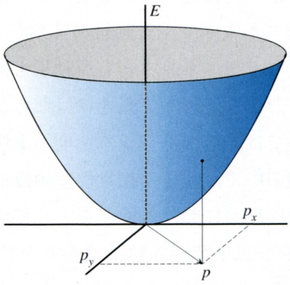
簡単に言うと，エネルギーと運動量は独立ではないので，Aの粒子がある方向を向いているとき，その運動量の大きさはエネルギー保存則で特定の値に決まっている。もちろん，粒子Aはいろいろな方向に出ていくことができるが，その方向への運動量の大きさは(速さといってもよい)エネルギー保存則から決まっているということである。

ラザフォードの実験の標的粒子は，入射してくるα粒子よりも質量がはるかに大きい。このような場合には，衝突後の標的粒子は非常にゆっくり動くだけだ。標的に移ったエネルギーは無視してよいので，α粒子は入射してきたときとほぼ同じエネルギー(したがって同じ速さ)で出ていく。ただ，原子核で弾かれるだけだ。α粒子は4つの核子(2個の中性子と2個の陽子)からできている。そして，ラザフォードが使った標的は金(197個の核子からできている)とアルミ(27個の核子)だった。α粒子は，軽すぎもせず(原子の中の電子に比べるとはるかに重い)重すぎもしない，この実験に理想的な入射粒子だった。

質量一定の粒子に対する運動量とエネルギーの関係は非常に大切で，後でも重要な役割を果たす。この関係は，マスシェル(質量殻)関係式という名前でよ



一定質量の粒子に対するエネルギーと運動量の関係。運動量の値を決めて，そこから真上に垂線を伸ばすと(破線)曲線と一点で交わる。そこから水平線を引き，エネルギー軸との交点を求めると，その値が選んだ運動量に対応する運動エネルギーを表す。



運動量が2成分ある場合の同じ図

ばれている。この名前は，この関係式を表した図に由来している。ある粒子のエネルギーと運動量を図示してみよう。

運動量は普通3次元のベクトルだが，しばらくの間，1方向だけの運動量に制限しよう。そうすれば，そちら向きの運動量を横軸に，エネルギーを縦軸にして図示できる。運動量には正の値と負の値がある(それぞれ右方向と左方向に運動する場合)。このとき，エネルギーは放物線で表せる。関係式が2次式だったことを思い出してみよう。ある運動量にあるエネルギーが対応しているとき，運動量が2倍になるとエネルギーは4倍になる。

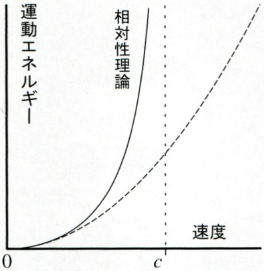
2成分の運動量がある場合には，前の図をエネルギー軸の周りに回転すると，3次元の図が得られる。x方向の運動量は紙面に平行な軸に，y方向の運動量を紙面に垂直な軸にとる。できあがった図はシェル(殻)のように見えるので，物理学者はこれを**マスシェル**(mass-shell)とよぶ。与えられた運動量pの成分をp_xとp_yとすれば，対応するエネルギーは図のように求められる。p_xとp_yが与えられたら，水平面内に運動量pを図示する。その点から垂直真上に直線を引くと，シェルと交わる。点pから交点までの線の長さが，運動量pに対応するエネルギーを表す。

相対論的な粒子，つまり光の速さに近い速さで運動する粒子に対しては，曲線は放物線から少しずれる。詳細は次の節で述べることにしよう。

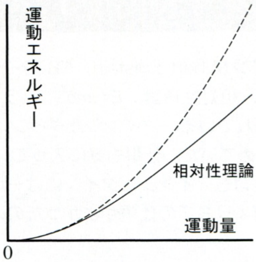
4.3　相対性理論

粒子が光速に近い速さで走っている場合には,相対性理論の効果が重要になる。運動エネルギーや運動量の速度依存性も変わる。具体的には，速度が光速(c)に近づくとエネルギーも運動量も無限大になってしまう。エネルギーは有限のはずだから，決して光速にはならないということである。このように，相対性理論では光速があらゆる速度の上限になる。

図の中で，波線は相対性理論以前のエネルギーと速度の関係を示し，実線は相対性理論における関係を表している。素粒子物理の実験では，実質的に光速の99% 以上で走る粒子ばかりを扱う。速度よりも運動量を直接用いるほうが都合がよいのは明らかだ。エネルギーと運動量の関係は，相対性理論に移ってもそれほど違わない。実際，運動量が大きくなったときに，エネルギーは以前



ほど急激には増加せず，比例して大きくなるだけだ(エネルギーは近似的に運動量に光速 c を掛けたものになる)。典型的な場合を，次の図に示してある。破線は非相対論的な場合を示し，実線が相対論的に正しい関係を表す。



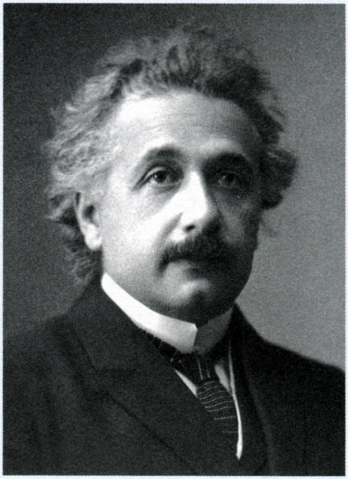
数式を使った説明のほうが好きな人は，第1章で引用した式を思い出すとよい。特に，図に示したエネルギーと運動量の関係は

$$E=c\sqrt{p^2+m^2c^2}$$

あるいは，$c=1$ という単位を選ぶと

$$E^2=p^2+m^2$$

もうひとつ重要なのが，アインシュタイン $E=mc^2$ という式である。この有名な式はいろいろな方法で導くことができるが，どれをとっても直観的に美しい方法ではない。この式は静止している粒子のエネルギーは0ではなく，質量に光速の2乗を掛けた量になることを意味している。素粒子物理学では，この式を日常的に使う。というのも非弾性反応では，反応の後に出てくる粒子はも



アルベルト・アインシュタイン(Albert Einstein, 1879-1955)　アインシュタインが4つの革命的な論文(光量子，相対性理論，$E=mc^2$，ブラウン運動の説明)を発表した1905年は，奇跡の年とよばれている。アインシュタインは，1902年から1907年まで，ベルンの特許事務所に勤めていた。仕事も気に入っていたし，給料も悪くないので，そこで十分に幸せだった。上司もアインシュタインには一目おいており，周りの人も彼の技量を高く買っていた。何よりもこの仕事がよかったのは，物理学を研究する余暇がたっぷりあったことだ。

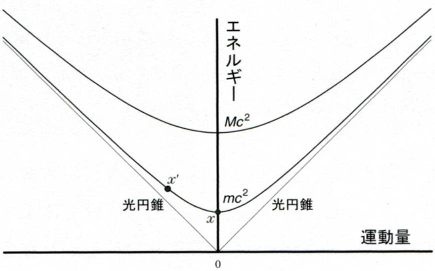
数少ないアインシュタインの秘話を2つ紹介しよう。

ある時，アインシュタインはエーレンフェストに伴われてオランダ女王に謁見した。アインシュタインは礼服をもたなかったので，エーレンフェストに貸してもらった。エーレンフェストのほうは，洋服だんすからぷんぷんと防虫剤の臭いがする服を引っ張り出した。これに王族が気づかないはずはない。アインシュタインは後に，「でも王族の鼻では，私たちのどちらが悪臭を放っているのかわからなかったようです」と語った。

「国籍はどちらですか」と聞かれたアインシュタインは次のように答えた。「私が死んだ後に決まるでしょう。もし私の理論が実験で正しいとわかれば，ドイツ人は私をドイツ人だと言い，フランス人は私がユダヤ人だと言うでしょう。もし立証されなかったら，ドイツ人は私をユダヤ人と言い，フランス人は私がドイツ人だと言うでしょう」。実際には，彼はアメリカの市民権に加えて最後までスイス国籍を保持していた。

ともと存在した粒子と異なるので，この静止質量のエネルギーも計算に入れないとエネルギー保存則が成り立たなくなってしまうからだ。終状態と始状態の粒子は質量が違うため，終状態と始状態では異なる質量エネルギーをもつ。実は,先ほど詳しく説明した中性子崩壊が最初の例である。この崩壊はアインシュタインの法則の美しい直接証明になっている。エネルギーと質量の関係だけでなく，相対性理論のすばらしい性質をはっきりと見せてくれるのが，まさに素粒子物理学である。もうひとつの例は，不安定な粒子，特にミューオンの寿命である。実験室の中で走っているミューオンが長生きするように見えるのは，相対性理論による時間の遅れと一致している。

このように,エネルギーと運動量の関係を考えるときには,質量とエネルギーが同じだということも考慮する必要がある。次の図は2つの異なる粒子についてエネルギーと運動量の関係を示している。質量はそれぞれ m と M で表し，M を m の3倍としている。運動量が零の場合のエネルギーは，m と M に対して，それぞれ mc^2 と Mc^2 になる。



この図はきわめて重要である。この図からはいろいろな結論が引き出されるので，よく理解しておいてほしい。特に難しいことはない。図中の曲線は，それぞれ粒子の運動量とエネルギーの関係を示している。質量 m の粒子がある運動量をもつとき，その粒子のエネルギーは質量 m に対する曲線から読み取ることができる。運動量が0のときには，エネルギーは mc^2 になる。

図を描くにあたっては単位を選ぶ必要がある。この図では，光速が1になるような単位を採用している。正でも負でも運動量の絶対値が非常に大きいときには，エネルギーはほぼ運動量の絶対値に等しい。図には，エネルギー＝±運

動量で表される対角線が描かれている。運動量が大きくなると，曲線はこの対角線に近づいていく。対角線は光円錐を定義しているのだが，光円錐についてはすぐに述べる。

この図を描く際，運動量は1つの成分しかもたないと仮定した。もし運動量が平面内にあれば(0でないのが2成分)，図は3次元的になる。そのときの図は，この図をエネルギー軸周りに回転したものである。そうすると2つのマスシェルと1つの円錐が得られるが，これが光円錐である。

相対性理論から得られる結果のひとつは，粒子の速度が運動量とエネルギーの比と等しいことである(光速が1になる単位系をとっている)。したがって，曲線上の任意の点における速度は，その点の水平方向と垂直方向の座標の比として知ることができる。運動量が大きくなると，この比は1に近くなるので，粒子は光速に近づく。

第1章で示した運動量，エネルギーと速度の関係式は

$$v=\frac{p}{E}$$

ここでは，$c=1$ という単位を使っている。粒子がゆっくり運動しているときには，エネルギーはほぼ静止エネルギー，つまり $mc^2=m$ に等しい。したがって，$v=p/m$ あるいは $p=mv$ となる。

この図のおもしろい点は，質量が0に近づくときの振る舞いである。曲線の点 x (mc^2 と書かれている太い点)を原点まで引き下げてみよう。すると，明らかに曲線は光円錐になる。したがって，質量0の粒子が存在することも確かに可能で，エネルギーは運動量の絶対値に等しいということがわかる。運動量とエネルギーの比はいつも1になるので，いつも光速で運動することもわかる。光子の質量はまさに0である。エネルギーや運動量もきちんと定義されている。ニュートリノの質量も0である(本当に0なのか非常に小さな質量をもつのかに関する疑問はある)。厳密に質量が0の粒子としては，強い力を媒介するグルーオンと重力を伝える重力子もある。

粒子を観測する座標系を変えたときに，エネルギーや運動量がどのように変化するかを理解する際にも，この図が役に立つ。まず，静止した質量 m の粒子を考えよう。エネルギーは mc^2 で，運動量は0だ。図中では点 x で表して

ある。次に，この粒子に対し速度 v で走る座標系から見てみよう。この座標系から見ると，粒子は速度 $-v$ で走っている。速度が小さければ，運動量は $-v$ に粒子の質量 m を掛けると得られるが，粒子が速ければ第 1 章の 4 節で説明した式を使う。エネルギーも同じようにこの速度で表せるが，運動量とエネルギーは図の曲線で示した関係にある。したがって，この座標系から見たエネルギーと運動量の値に対応する点 x' は，同じマスシェルのどこかに(例えば図に示した所)あることになる。言い換えると，観測する我々が運動しているのか，我々は静止していて粒子のほうが運動しているのかを見分けることはできない。運動量とエネルギーの関係はどちらの場合も変わらないからである。これがまさに相対性理論の考え方である。

4.4 相対論不変性

アインシュタインの相対性理論では，不変性原理の重要性が明確な形で強調されている。ガリレオやニュートン以来，さまざまな原理が広く受け入れられてきた。例えば，座標軸の方向だけが違う 2 つの座標系における物理は同じであるはずだ，という回転不変性である。どちらの座標系にも物理学者がいて，それぞれが自分の実験室で実験を行って物理法則を導こうとしている場面を思い浮かべてほしい。2 つの実験室はそれぞれ違う方向を向いているが，その他の点は同じである。片方の物理学者が昼間に実験を行ったとしよう。その人が帰宅するときに，誰かが実験室全体をある角度回転させるとする。その後で，もうひとりの物理学者がやってきて，夜の間に同じ実験を行い，朝になると実験室を反対方向に回転させて元に戻すのだ。物理法則の回転不変性は，この 2 人の物理学者が，同じ結論，同じ基本法則，同じ物理定数に到達することを意味している。同じ気体を暖めれば同じスペクトル線を測定するし，同じ電気の(マクスウェルの)法則を導き出し，同じ運動法則に到達する。もちろん，お互いに相手を観測すれば，自分達が違った方向を向いていることはわかるだろう。しかし，どれだけ回転しているかがわかれば，互いに得た結果を翻訳し合うのは簡単である。

大抵の人は，この種の不変性を自明のこととして受け入れる。別の例としては，空間と時間の並進不変性がある。ヨーロッパで導かれた物理法則は，アメ

リカや月で導かれる物理法則と同じである。さらに，今日導かれる物理法則は，昨日そして明日導かれるものと同じだろう。これらの不変性はとりたてて意外なものではないが，その重要性が理解されたのは20世紀に入ってからだった。だが，これほどあたりまえに思えることも，相対性理論の出現以降はそれほど自明でなくなり，もっと綿密に検証する必要が生じてきた。アインシュタインの相対性理論は(回転や並進不変性に加えて) 2つの原理に基づいてつくられている。

— 互いに等速運動する座標系は同等

— 互いに等速運動する座標系における光速は一定

1番目の原理はアインシュタイン以前から物理学で使われていた。自明でない効果を生み出すのは2番目の原理だ。運動している光源から出た光と，静止している光源から出る光が同じ速さで走るとは思う人はいないだろう。運動している光源から出る光のほうが，光源の速度だけ速いと思うに違いない。誰かが，走っている電車から進行方向に向かって石を投げる様子を思い浮かべるとよい。地面に立っている別の人から見た石の速さは，(電車から見た)石の速さに電車の速さを加えたものになると思わないだろうか。電車に乗っている人が静かに石を落としたときですら，地面に静止している人から見ると，石は電車と同じ速さで飛んでくるだろう。電車に乗っている人から見た速度と地面に立つ人から見た速度は異なる。にもかかわらず相対性理論では，電車中の石が光速で走るならば，地面に立っている人から見ても速度は変わらない(石を光速で走らせるためには無限のエネルギーが必要だということには目をつぶる)。電車の速度の分はどうなったのだろうか？　何かがおかしい。実は，アインシュタインは問題をひっくり返したのである。速度を測るには距離と時間を測定しなければならないが，距離や時間は我々の日常経験とは違って，測定する人の運動状態に依存する。だから同じ現象を電車に乗っている人と地面に立っている人が測定したとき，2人がそれぞれに測った距離と時間は，非常に不思議な関係で結ばれている。こうも言える。電車に乗っている人が進行方向に向かって投げた石の速度を測定する。そのとき地面に立っている人が測った石の速度は，予想に反して，電車から見た石の速度と電車の速度を加えたものとは**異なる**。もちろん，速度が光速に近くないかぎりその差は小さく，日常生活でこの効果を体験することはない。本当に不思議なのは光の速さが一定なことである，

世界を変えた論文：$E=mc^2$

物理学年報　20 (1905 年) 639 頁

13. ***Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?***
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir

～～～

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um L, so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $L/9.10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Grammen gemessen wird.

Bern, September 1905.

この短い論文(3 頁)で，アインシュタインは $E=mc^2$ の導出法を示した。彼が記述しているのは，$m=E/c^2$ という形の式だ。光速の 2 乗には，9×10^{20} という値が与えられている。これはちょうど $c=3\times10^{10}$ cm/s の 2 乗になっている。エネルギーは L と表されている。

アインシュタインが，これこれの質量にはこれだけのエネルギーが含まれている，という言い方をしていないのは興味深い。代わりに，「物体のエネルギーをその質量で測ることができる」と表現している。彼は，物体の質量をエネルギーの起源とは考えないで，物体に含まれるエネルギーを測る手段と見なしている。そのエネルギーを取り出すことができるかどうかは，まったく別の問題だ。

物体の慣性はエネルギーに依存するか？

A. アインシュタイン

最近物理学年報に出版した私の研究の結果……

～～～

物体の質量は，その物体のもつエネルギーを測る尺度である。エネルギーをエルグで，質量をグラムで測ることにすると，もしエネルギーが L だけ変化すれば，同じように質量も $L/9\times10^{20}$ だけ変化する。

このために，空間や時間の測定からいろいろ不可解なことが起きる。不思議な効果の例をあげよう。

素粒子物理学者が相対性理論の効果を直接体験するのは，不安定粒子の寿命を測定するときである。ミューオンは宇宙線や粒子加速器によって次々につくられるが，すぐに(およそ100万分の2秒後に)バラバラになってしまう。実は，ゆっくり動いているミューオンと高速で走っているミューオンでは寿命が異なる。速く走るミューオンのほうが長生きなのである。これは，相対性理論の直接の帰結で，粒子加速器の世界の日常茶飯事である。ある粒子の寿命について報告するときには，必ず運動状態を指定しておかねばならない。ちなみに素粒子物理学者が使っている素粒子の表には，静止した粒子の寿命を載せることになっている。距離を測るときにも似たようなことが起きる。距離を測るのに必要な数式は，アインシュタインが相対性理論を提唱する以前に，ローレンツによって導かれていた。そのため，互いに運動する座標系における測定値の関係式はローレンツ変換とよばれている。

最終的には，以前に論じたように，(一定の質量，運動量とエネルギーをもつ粒子に対応する)マスシェル上の点は，ローレンツ変換によってマスシェル上の別の点に移る。正確に言うと，点xが別の点x'に移るとすると，点xと相対速度が決まっていれば，ローレンツ変換によって，移る点x'の場所がわかる。この意味で，マスシェルは不変量になっている。質量をもつ粒子は，ほかの座標系に移っても同じマスシェル上にとどまる。質量0の粒子の場合には光円錐になるが，ほかの速度で運動する座標系に移っても，光円錐上の(エネルギーが運動量の大きさに等しい)点は光円錐状の別の(エネルギーはやはり運動量の大きさに等しい)点に移る。もちろん，エネルギーと運動量の値は異なる。

物理学には，このようにいくつかの不変性がある。回転したり，相対的に等速度で走る座標系へ移ったりしても物理法則が不変であることを，現在ではローレンツ不変性とよぶ。ローレンツ不変性に，空間や時間に対する平行移動不変性を加えた場合は，ポアンカレ不変性という。ローレンツもポアンカレもアインシュタイン以前に活躍した人だ。アインシュタインは相対性理論に基づく運動学をつくり，すべてを明確に理解できる形にしてくれた。

相対運動に対する不変性は，いろいろな状況を理解するのに役に立つ。ある物理的な過程がある座標系で禁止(許可)されているなら，その座標系に対して

等速運動をする座標系でも禁止(許可)される。例えば，静止している座標系で崩壊しない粒子は，動いている座標系でも決して崩壊しないことになる。このささやかな原理を有効に使えば，複雑な状況も明らかにすることができる。素粒子物理学では，一番使いやすい座標系を選んで議論することで，問題が非常に簡単になって助かることが多い。

4.5　関係式 $E=mc^2$

アインシュタインの関係式 $E=mc^2$ は神秘的な雰囲気に包まれている。この式が原子爆弾を作る出発点になったという逸話もある。神秘性を取り除くために，この式について少し詳しく説明しても害はないだろう。

もっとも単純には，この式はエネルギーが質量をもつことを意味している。物体の重さは質量に比例するので，エネルギーは重さをもつことになる。例えば，定期的にねじを巻かなければならない旧式の時計の場合，ねじが完全にゆるんでいるときに，時計の重さを量る。次にねじを巻いてバネにエネルギーを蓄える。バネに蓄えたエネルギーは重さをもつので，ねじを巻いた後で，もう一度時計の重さを量ると，少し重くなっているはずだ。重さの差は非常に小さいが 0 ではない[c]。その差を量れるほど大きなものにするには，莫大なエネルギーを蓄えなければならない。ほんのわずかな量の質量は，非常に大量のエネルギーに相当するのである。それは光の速度が非常に大きいためだ。電波の信号は 1 秒間に地球を 7 回半も回る。

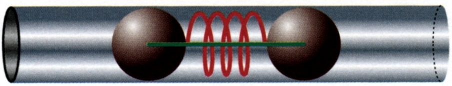
もうひとつ例をあげよう。重量が例えば 1000 kg の車があるとする。時速 100 km/h で走らせると，運動のエネルギーに相当する重量の増加は 2 億分の 1 グラムしかない[d]。エネルギーに対応する重さがほんのわずかであることがわかるだろう。アインシュタインが有名な式を提出するまでの間，この効果を測定できる人が現れなかったことも不思議ではない。実際，1937 年頃に実験で示されるまでにはずいぶん時間がかかっている。

---

[c] 100 兆分の 1 グラムほどの重さだ。

[d] 車の静止質量を M，車の速度 v は約 $\frac{1}{36}$ km/s，光速 c を 300 000 km/s とすると，$\frac{1}{2}Mv^2/c^2$ を計算すればよい。

別の例として，両側に砲弾を打てる大砲を考えよう。2つの砲弾を反対向きに発射できるので，敵に囲まれたときに役に立つかもしれない。この大砲の砲身は長く，両側に砲弾を詰める仕組みになっている。2つの砲弾の間に火薬を詰めてもよいが，ここでは，代わりに非常に強いバネを置こう。可能な限りバネを圧縮して，2つの弾丸をロープで繋いで離れないようにしよう。「撃て」の号令とともにロープを切れば，2個の弾丸は反対向きに飛んでいくだろう。砲弾の速さはバネに蓄えられたエネルギーで決まっている。



上の図はこのアイデアを表したものだ。緑の線は砲弾をつなぎとめるロープである。バネを圧縮する前に，砲身，2つの砲弾，ロープ，バネの重さを注意深く量っておく。次に，2つのボールを押してバネを圧縮すると，その仕事はバネに蓄えられる。ここで再び全体の重さを量ると，バネを圧縮する前よりも少し重くなっていることだろう。

中性子の崩壊も，両側に砲弾を打てる大砲と似たところが多い。アインシュタインの言葉をもじると，神がサイコロを投げ，6の目が出たらロープを切るとしよう。中性子が崩壊すると，電子とニュートリノが(必ずしも反対向きではないが)飛び出してくる。陽子はほぼ中性子のあった場所に止まっている。この反応のエネルギーは比較的大きい。中性子の質量から電子とニュートリノの質量を差し引くと，中性子の質量のおよそ0.1%になる(ニュートリノの質量は非常に小さいか0だ)。この質量の差が，電子とニュートリノの運動エネルギーに変わる。質量の大きい陽子は実質的には静止したままである。素粒子物理学では，ほとんどの反応において，アインシュタインの関係式があたりまえのように使われている。

原子爆弾の場合はどうだろう。アインシュタインの式 $E=mc^2$ を使えば，いろいろな物体の重さを量るだけで，その物体からどれだけのエネルギーを取り出すことができるかがわかる。ウランの原子核に中性子をぶつけると不安定になり，分裂していくつかの破片に分かれる(中性子もいくつか出てきて連鎖反応を引き起こす)。軽い元素，例えば鉄の原子核などである。ウラン原子核の

質量はよくわかっているし，分裂から生じるさまざまの破片の質量もよくわかっているので，どれだけの質量が失われたかは単なる引き算で求めることができる。減った分の質量は，崩壊後に出てくる粒子の運動エネルギーに変わるが，それは相当の量になる。そのときに役に立つのが，アインシュタインの式だ。この過程で現れる粒子の質量がわかれば，出てくるエネルギーが計算できる。崩壊によって出てくる粒子の運動エネルギーは，最終的には熱エネルギーに変わることを付け加えておいたほうがよいだろう(熱エネルギーは分子の運動エネルギーの一形態だ)。エネルギーが生じる真の原因は，陽子と中性子が原子核に閉じ込められていることだ。

アインシュタインは生涯にわたって，いろいろな方法で彼の公式を導いている。最初に導いたときは，静止した原子が左右両方に光を出していて運動量はいつも0となる場合を考察した。この現象を，原子に向かって走っている観測者から見るとどうなるだろうか。走る人にとって光線がどのように見えるかを知るために，アインシュタインは光円錐を用いた。エネルギー保存則を仮定すると，始状態と終状態にある原子のエネルギーの変化が正確に求められる。この現象を2つの座標系から観測する。一方は，光を放出する前後どちらも原子が静止している座標系であり，もう一方は光を出す前後に原子が運動量をもっている座標系だ。そうすれば，2つの座標系から見たときの原子のエネルギー変化の差がわかる。この値は，2つの座標系から見たときの光のエネルギー差と等しい。つまり，観測者の速度を変えると1つの曲線が得られる。アインシュタインはこの曲線から有名な公式を導いた。少し言葉を換えると，光円錐のことがわかっていれば，ほかの座標系から見たときに，光の放出前後に何が起きるかわかる。もちろん，導出の鍵となるのはエネルギーの保存則だ。

5 素粒子の見つけ方

5.1 序　論

本章では，素粒子物理学で用いられている実験手法について，ごく簡単に説明していく。詳しいことについては，ほかの専門書に譲ることにする。おおまかに知っておいてほしいのは，素粒子がどのように検出され観測されるのかということである。光電効果も外すわけにはいかない。単純で説明しやすい上に，光が粒子だという大切なことを示してくれるからである。

時代とともに粒子の検出法はがらりと変わった。1950 年以前に主流だったのは，ガイガーカウンター，写真乳剤，そしてウィルソン霧箱である。これらの装置は，後に泡箱に取って代わられる。60 年代初頭には放電箱(スパーク・チェンバー)が登場し，やがて多線式比例係数箱(プロポーショナル・ワイヤー・チェンバー)へと発展した。今日では，細い帯状の半導体(半導体チップに使われているものと同じ材料)を用いた検出装置もある。

検出器は，荷電粒子が通った後にできる飛跡を検出するものが多い。逆にいえば，荷電粒子のみしか検出できない仕組みになっている。荷電粒子は，物質を通過するときに原子から電子をはじき出す。つまり物質構造を乱しながら，電離電子を生み出していく。したがって荷電粒子が通過した後には，乱れた物質やイオンの列と電離電子が残る。電離電子を集めると荷電粒子の通った位置がわかる。電子が 1 個以上足りない状態の原子や分子を，イオンという。軌跡上のイオンは，通常の場合，1 個以上電子が足りないので，正の電荷をもっている。飛跡の見え方を概念的に図示してみよう。イオン(青点)はあまり動かない。はじき出された電子は，どこかに飛んでいってしまう(赤い矢印)。



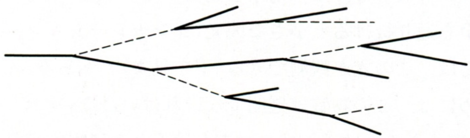
ある種の有機物質中を通ると，荷電粒子は可視光の光子を放出する。この現象が見つかったのは，虫除けに使われるナフタリンからだった[a]。ナフタリンのような複雑な分子の場合，荷電粒子との衝突によって，電子はエネルギーの高い軌道に飛び移る。その電子が元の軌道に戻るときに，余ったエネルギーは光，つまり光子となって放出される。この光はほんの一瞬，青みがかった閃きとして見える。このとき発生した活性物質は，通常，液体に溶け込んでしまう。シンチレーション計数管は，この効果を元につくられている。荷電粒子は，このような物質中を通り抜けると小さな閃光(シンチレーション)を発する。光電子増倍管を使えば，この光が観測できる(下を見よ)。もちろん，物質の外側から光を見るためには，この物質は透明でなければいけない。シンチレーション計数管は，トリガーあるいは逆トリガーをかけるときに用いられることが多い。トリガーというのは，シンチレーション計数管で粒子が来たことを確かめた上で，軌跡を観測する装置を作動させることだ。場合によっては，ある場所に粒子が来ないときに，ほかの所で何が起きるかに興味があることもある。そのような場合には，逆にトリガーをかける，つまり，シンチレーション計数管に粒子が来ている間は，粒子検出装置を作動させないようにする。

物質中を通過する光子は，中性だが，観測可能な効果を引き起こす。十分大きなエネルギーをもつ光子は，原子核近くの電場(クーロン場)を通過するときに，電子と陽電子の対生成を起こす。つくられた粒子対が飛跡を残すので，観測できるようになる。原子核の近くを通過する高エネルギー電子は，光子を放出することが多い。この現象は，ドイツ語で制動放射を意味するブレムズシュトラールンクとよばれている。電子が原子核の近くを通ると，電場に引かれて減速して光子を放出する。電子のエネルギーが十分大きければ，放出された光子も大きなエネルギーをもち，この光子がほかの原子核近くの電場を通過するときに，電子–陽電子対をつくりだす。こうしてつくられた粒子がまた制動放射

[a] カールマン(Kallmann)と，彼の学生のブローゼル(Broser)による。ユダヤ人だったカールマンは，実験を続けながら，奇跡的にドイツでの大戦を生き延びた。

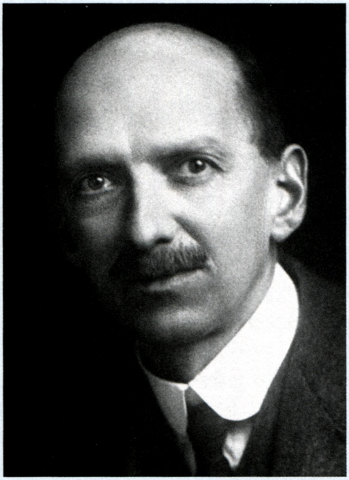
を繰り返すので，最終的に電子なだれ(シャワー)が起こる。高エネルギーの光子や電子，陽電子は，電子なだれを引き起こす。電子なだれはこれらの粒子の特徴となっている。

電子と陽電子は飛跡を残すので観測できる。だが光子自体は飛跡を残さない。最初に入射してきた粒子のエネルギーが大きければ，シャワー中で発生する電子と陽電子の数も多くなるので，電子・陽電子数を，入射粒子がもっていたエネルギーの尺度として使うことができる。図中の点線は光子を示す。電子よりもはるかに重い粒子(つまりすべての粒子)は，制動放射をほとんど起こさないので，シャワーは発生しない。



素粒子を観察するには，チェレンコフ放射を用いてもよい。水中を通過する荷電粒子は，光子を放出する。飛行機が飛ぶときに音が出るようなものである。水に入った光は，曲がりくねりながら水中を進んでいく。水中の光速は，真空中よりも遅い。だから高速の高エネルギー粒子が水中を進む場合は，水中における光速よりも速いことがある。そのとき生じるのが光の衝撃波である。つまり，高速粒子を先頭にして，その後ろに光が円錐状に広がっていくのだ。発見者のロシア物理学者チェレンコフにちなんで，この現象はチェレンコフ放射と名づけられている。たいていの場合，チェレンコフ光は青味がかっている。特に原子炉の重水中では，鮮明である。光の円錐の開き具合を表す角度は，粒子の速度が媒質中の光速を上回る程度によって変わってくる。したがって，円錐の角度がわかれば，その粒子の速度を正確に測定できる。チェレンコフ放射を見るには，光電子増倍管を使えばよい。

中性の粒子(光子，中性子)自体は，イオン化した飛跡を残すことはない。だから間接的にしか観測できない。例えば，物質中で光子がつくりだす電子–陽電子対を観測すれば，光子が見られる。強く相互作用する中性粒子(例えば中性子)は，たいていの場合，瞬く間に原子核と衝突(多くの場合，原子核は壊れる)して，いくつかの荷電粒子と原子核の破片を生み出す。中性(あるいは荷電)



チャールズ T. R. ウィルソン(Charles T. R. Wilson，1869-1959)　霧箱を発明したのがウィルソンである。彼は，1895 年に荷電粒子のまわりの水蒸気が凝結して水滴になることを発見した。この水滴の電荷を測るのが，荷電粒子の電荷を測定する最良の方法である。

開発を続けたウィルソンは，1911 年に霧箱を完成させた。霧箱は，イオン周辺に凝結した水滴によって，粒子の飛跡を可視化する。彼は，実際に飛跡写真も撮影した。水蒸気の密度はそれほど高くないので，霧箱の中の水蒸気を標的にして，粒子の衝突反応を測定するわけにはいかない。標的となる物質が少なすぎるからだ。液体を含む写真乳剤や泡箱のほうが，この点では適している。1927 年，ウィルソンはコンプトン(Compton，1892-1962)とともにノーベル賞を受賞する。のちにグレーザーが泡箱を発明すると，霧箱と写真乳剤は実験物理学における重要性を失っていった。とはいえ，霧箱や写真乳剤の貢献は，素粒子物理学の発展に欠かせないものだった。グレーザー自身が，出発点は霧箱だったと認めているのだからまちがいない。

霧箱をつくるのは簡単である。インターネットでも，霧箱のつくり方や図を見つけられる。霧箱を使えば，宇宙線も見られるし，いろいろおもしろい発見もできるだろう。放射線源を置くと，そこから出る放射線の飛跡がみえる。α 粒子を放出する線源なら特に見えやすいだろう。α 粒子は，中性子 2 個，陽子 2 個からできている。つまり，ヘリウムの原子核そのものだ。

1958年のノーベル物理学賞受賞者，**パーヴェル・チェレンコフ**（Pavel Cherenkov, 1904–1990），**イリヤ・フランク**（Il'ia Frank, 1908–1990），**イーゴリ・タム**（Igor Tamm, 1895–1971）。現在，チェレンコフ放射とよばれる現象を発見したのがチェレンコフ（と Vavilov），その理論を発展させたのが，フランクとタムである。実験的発見を代表するすばらしい例である。1934年当時，蛍光現象は広く知られていた。蛍光現象とは，物質が放射線（実は，音波も同じ振る舞いをする）を吸収した後に光を発する現象のことだ。ただし，光はしばらく時間が経ってから放出されることもある。多くの研究者が蛍光現象を研究した。なかでもベクレル父子は卓越した専門家で，彼らの取り組みは後の放射能の発見に結びついた。話を戻すが，チェレンコフは，ラジウム源から出てくるガンマ線が，さまざまな溶剤を通過するときに起きる効果について研究していた（ガンマ線の正体は光子だ）。実験中にかすかな青い光を目にしたチェレンコフは研究を進め，ガンマ線が液体分子と相互作用するときに生じる高速電子が引き起こす光だということに気がついた。彼の言葉を借りれば，この現象はキュリー夫妻が以前に研究していた蛍光の一種で，特に関心をひく点はないように思えた。だが彼は，その青い光に見覚えがあった。

チェレンコフは注意深く調べ続け，青い光の本質を解明した。青い光は，電子が物質中を非常に高速で通り抜けることによって生じていた。さらに，フランクとタムの理論的研究によって，その機構が明らかになった。物質を通過するとき，電子の速度が物質中の光速を超えることが原因だったのだ。遥か以前の1904年に，別の文脈ではあるが，まさにこの問題をゾンマーフェルト（Sommerfeld）が論じていたのは興味深い（彼はきわめて優秀な物理学者であると同時に，卓越した教育者でもあり，ハイゼンベルクやパウリなどの著名な学生を育てた）。アインシュタイン以前のことだから，電子の速度が光速を超えても理論的には問題がないと考えられていた。ゾンマーフェルトは，超光速で走る電子がつくる光の衝撃波[†]について論じている。

おもしろいことに，チェレンコフ自身はチェレンコフ計数管をまったくつくっていない。彼らしいことである。だが，チェレンコフ計数管は，ほぼすべての素粒子物理実験において重要な働きをしている。

---

† （訳者注）超音速で飛ぶ飛行機がつくる音の衝撃波のようなもの。

粒子が不安定で崩壊する場合もある。このとき崩壊によって出てくる粒子が，電荷をもてば観測することができる。

では，これまでの方法をまとめておこう。

高速で走る荷電粒子は物質をイオン化する。このとき生じる変化は，いろいろな方法で観測できる。ガイガーカウンターやウィルソン霧箱，泡箱，放電箱を使えばよい。多線式比例係数箱を使えば，原子からはじき出された電子によって起こる電子なだれも観測できる。

荷電粒子は，ある種の分子をエネルギーの高い状態に励起する。そしてエネルギーの低い状態に戻るときに光を放出する。シンチレーション検出器はこの原理に基づいている。

媒質中を通過する高エネルギー荷電粒子は，音速を超えた飛行機がつくる衝撃波のような光を放出する。この原理を利用したのがチェレンコフ検出器である。

物質に低エネルギー光子が衝突すると，電子が弾き出される。水に石を投げ込むと，水飛沫が上がるようなものだ。光電効果とよばれるこの現象は，光電子増倍管に応用されている。光電子増倍管を使えば，エネルギーが比較的低い光子(可視光や紫外線)が見える。

中性の粒子は，間接的にしか見ることができない。例えば，原子核の近くを通過するときにつくりだされる電子-陽電子対を観測すれば，光子が通過したことがわかる。中性の素粒子も原子核と衝突して，原子核を破壊することがある。このときに，電荷を帯びた破片が飛び散る。不安定な中性の素粒子は，崩壊するときに荷電粒子が出てくれば，観測することができる。

さらに，今日では，通過する荷電粒子の検出に細い帯状の半導体を使うこともある。

人間の知恵によって，粒子を検出する新しい方法が次々と生み出されていく。実験手法は，時代の流れとともに進化している。ウィルソン霧箱や写真乳剤，泡箱は，今では使われていない。現在では，実験装置の主流といえば，シンチレーション計数管，放電箱，多線式比例係数箱である。泡箱や放電箱を使えば，粒子の飛跡写真を撮ることができる。目に見える画像は，何にもまして直接的で示唆的要素に富んでいる。多線式比例係数箱は，コンピュータに直接情報を送り込む。そういう意味では，やや間接的である。たいていの実験は現在ではコンピュータによって制御されている。悲観的な人なら，近い将来，コンピュー

タが論文を出したり，コンピュータどうしで交流するようになる，と考えるかもしれない。だが，そのような考えをもつこと自体，人間の創意工夫や知識への渇望や欲求を過小評価している。高エネルギーの素粒子物理学は，巨大科学化しているといってもよいだろう。ある意味では，宇宙研究と比べられるかもしれない。月や惑星に行くことが，何の役に立つかはわからない。だが，役立たないとしても，是非ともやり遂げる必要がある。個人的にできる範囲を超えた冒険ではあるけれども。我々はもっと知りたいのだ。

本章の残りの部分で，主な検出器についてもう少し詳しく説明していこう。まず光電子増倍管，放電箱，そして多線式比例係数箱である。

5.2 光電効果

光子検出器は特別な存在である。20世紀初頭に光電管が発明された。しかし，光子の振る舞いが正しく理解されるようになったのは，相対性理論と同じ年(1905年)に，アインシュタインが光量子仮説を発表してからである。その論文では，光は量子化されており，一定の振動数(色)をもつ光は一定のエネルギーをもつ光子からなると考えられていた。この考え方は，1900年に発表されたプランクの考えとは若干異なっている。プランクは，物質が光を放出するときには，決まった量ごとにエネルギーを1かたまりとして放出すると考えた。つまりプランクの考えでは，光は発光源から量子パックとして放出される。一方，アインシュタインの考えでは，光のエネルギー自体が，かたまりとしてしか存在できない。$E=h\nu$という関係を初めて提唱したのはプランクである。この式は，光のかたまり，つまり光子のエネルギーは光の振動数に比例することを意味している。光の振動数(ν)と定数hがわかれば，基本単位としての1かたまりがもつエネルギーが計算できる。hはプランク定数とよばれている。値は$h=6.626\times10^{-34}$ジュール毎秒であり，この値はプランクが，黒体[†]が放出する光の振動数分布(スペクトル)の実験結果を説明するために導入した。しかしプランクは，この値が光の性質を示しているとは夢にも思わなかった。その点に踏み込んだのがアインシュタインである。

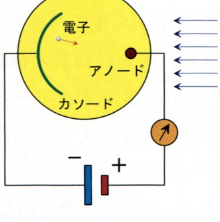
---

† (訳者注)当てた光をすべて吸収する物体で，黒く見える。温度を上げると光を放出しはじめる。例えば，常温では黒いニクロム線も，熱くなると赤く見えるようになる。

大切な点を復習しておこう。プランクが提唱したエネルギーと振動数の関係によれば，光の振動数が高くなると，エネルギーのかたまり，すなわち光子のエネルギーが大きくなる。振動数が低い赤色光と比べると，青い光を構成している光子のエネルギーは大きい。本書で扱う現象のエネルギーと比べると，可視光のエネルギーはとても小さい。例えば，赤色光の光子のエネルギーは1.5 eVだが，青色光では3 eVである。紫外線の光子は3 eV以上，X線になるとさらに大きい。硬X線の光子エネルギーは，10 keV (1 keV＝1000 eV)ほどである。

プランク定数の導入は，量子力学の幕開けとなった。今日では，この定数は，すべての量子化の基礎となっている。さらに偶然にも，プランク定数が発見されたのはちょうど1900年である。“*Inward bound*(内部への道)”の著者，パイスの言葉を借りると，「もし20世紀物理学においてもっとも革命的な発見をひとつだけ示せといわれたら，私は躊躇なく，プランクの1900年における発見をあげる」。実際，この発見は実に大変なものである。当時そのような兆候はまったくなかったし，誰一人として同じような考えをもつに至らなかったけれど。

では，光電効果について説明しよう。光がカソード(陰極)の表面に当たると，電子が外へ放り出される。そこに電場をかけると，出てきた電子は別の電極，つまりアノードとよばれる陽極に引き寄せられる。すると非常にわずかだが電流が流れる。



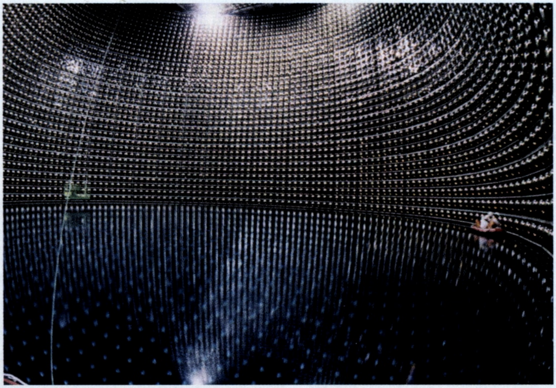
不思議なのは，どんな色の光でもよいわけではなく，虹に現れる色の中で特定の色に限って，このような現象が起こる点である。我々が目にする虹は，赤，橙，黄，緑，青，紫といった色が順番に連続して並んでいる。先ほど述べた現象は，青や紫色でしか起こらない。つまり，赤や橙，緑色では起こらない。緑色の場合，どんなに強い光を当てても電子が弾き出されることはない。だが青

い光なら，いくら弱くても光電効果が起こる。アインシュタインは，光のエネルギーがかたまりとしてつくられるだけではなく，常にかたまりとして存在すると考えて，この謎を解いた。光子(光量子)という考え方の誕生だ。この考え方には，それまでの考え方と大きな違いがある。光がかたまりとして放出されるだけで，光自身はどんなエネルギーでももつことができると仮定すると，小さなかたまりをたくさん集めれば，大きなエネルギーをもつ1かたまりの光をつくることができる。だが，光が常に光子のかたちでしか存在できないとしたら，どうだろう。かたまりをたくさん集めて，大きなエネルギーをもつ光をつくることはできるが，そのエネルギーはたくさんの光子の集まりにすぎない。ひとつひとつの光子がもつエネルギーは小さなかたまりである。1人の大きな巨人と，100人の小さな人間の違いのようなものである。さて，光子はエネルギーのかたまりとして振る舞うが，光子のもつエネルギーの大きさは光の色(振動数)によって変わる。物質の中から電子を放り出すためには，ある程度のエネルギーが要る。例えば，青い光子は十分なエネルギーをもつが，緑の光子のエネルギーは少なすぎるので，電子を放り出すことができない。この1個の光子がもたなければならない最小のエネルギーの値(閾値)は，物質表面に当てる光を強くしても(光子数を増やしても)，変わらない。もちろん，正しい色の光子を当てると，生ずる電流の強さは光の強さ(光子の数)に比例する。とにかく，光電効果を起こしたいなら，青か紫の光でないといけない。緑光では何も起こらない。

具体的な数字をあげよう。物質中から電子を放り出すためには，ある閾値(最小値)を超えるエネルギーが要る。閾値は物質の種類によって異なる。ある物質の閾値を超えるには，2 eVを上回るエネルギーが必要だとしてみよう。赤色光の光子のエネルギーは約1.5 eVなので，その物質から電子を外にたたき出すにはエネルギーが足りない。だが，エネルギーの高い青色光(3 eV)の光子なら大丈夫である。余った1 eVは，物質から飛び出した電子が，運動エネルギーとしてもっていく。この事実は，余ったエネルギーが光の振動数に比例する[†]という，アインシュタインの考えを検証する重要なテストだ。実際に検証したのは，ミリカンである。1915年，何年にもわたる入念な研究の末，彼は0.5%

---

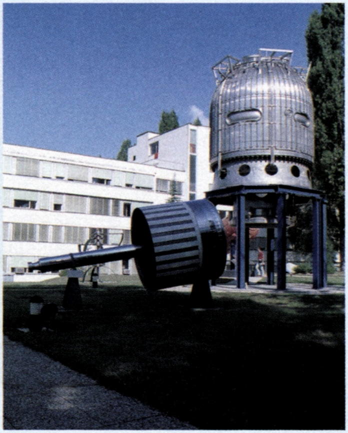
† (訳者注)アインシュタインの考えでは，比例係数はプランク定数になる。



スーパーカミオカンデ　日本の神岡鉱山の，深さ 1000 m の地下につくられたのが，カミオカンデ（東京大学宇宙線研究所）と後継機のスーパーカミオカンデ実験装置である。スーパーカミオカンデには，大量の水（高さ 39.3 m，直径 39.3 m）の周りを取り囲むように，直径 50 cm の光電子増倍管（PMT）が並べられている。ニュートリノが水と相互作用すると，荷電粒子が飛び出す。荷電粒子が水の中を走るときに放出するチェレンコフ光を，周りを囲む光電子増倍管が検出する。ニュートリノは，宇宙線と衝突した大気や太陽および星などから，地上に降ってくる。もともと，この測定器は陽子崩壊を見つけるために建設された。だが陽子崩壊自身は見つからなかった。そのこと自体も重要だったが，さらに，この装置は抜群のニュートリノ検出器であることがわかった。すばらしいニュートリノデータから，ニュートリノが質量をもち，ニュートリノ振動を起こすことが示されたのである。1987 年には，予期せぬ超新星爆発が起こり，超新星起源の 11 個のニュートリノが初めて検出され，ニュートリノ天文学の幕開けとなった。IMB 検出器（カルフォルニア州立大学アーバイン校，ミシガン大学，ブルックヘブン研究所の共同実験）も，アメリカのオハイオ州の塩鉱山で，8 個のイベントを見つけた。

小柴昌俊（Masatoshi Koshiba，1926）は，この業績により 2002 年のノーベル物理学賞を受賞した。同時に受賞したのはレイモンド・デービス・ジュニア（Raymond Davis Jr.，1914）で，ポンテコルボ（Pontecorvo）が提案した塩素アルゴン法を用いて，別のニュートリノ実験を行った。

時として，実験物理学者は困難に見舞われる。2001 年の 11 月 12 日，1 個の光電子増倍管が爆発した。生じた衝撃波で 11146 個の光電子増倍管のうち，6777 個が破壊された。水槽の底にはガラス破片の山が築かれたが，この信じられないような悲劇も実験を止めることはできなかった。2002 年の 9 月には，光電子増倍管の数を少なくして実験が再開された。壊れた光電子増倍管を購入するのに，2400 万ドルが必要となった。

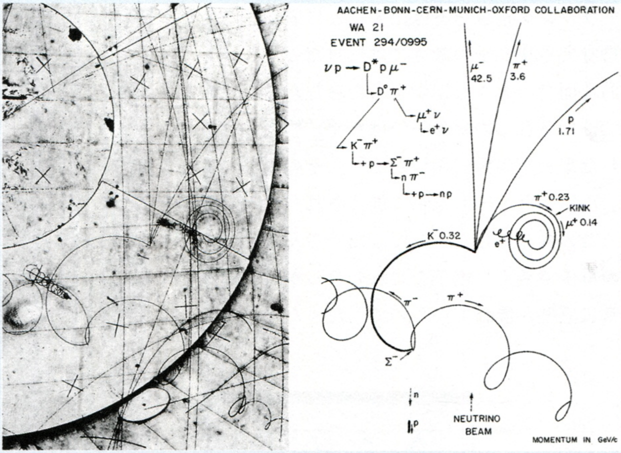



ドナルド・グレーザー(Donald Glaser, 1926)　泡箱の開発者。1952 年，ミシガン大学でグレーザーが使い始めたのは，ジエチルエーテルを満たした 3 cm^3 のガラス容器だった。装置は，すぐに大型化した。隣の写真は，直径が 3.7 m もあるセルンの巨大な泡箱(BEBC)である。現在では使われていない。BEBC の中は，充填された液体水素で常に－253℃ に保たれている。この装置で観測された反応で標的として使われたのは水素の原子核，つまり陽子である。水素を使うと，はっきりと明瞭な飛跡が得られる。次ページの写真を見てほしい。もちろん欠点もある。水素をつめた泡箱の中では，通常，光子はシャワーを起こさないのである。また，電子もシャワーを起こさない。

素粒子実験において，泡箱は，かなり長期にわたって隆盛を誇った。標的の質量を十分に重くするために，重い液体で満たした泡箱を使うこともある。冷蔵庫に使う液体あるフロンを充填するのだ。この型の泡箱を使うと，簡単に光子シャワーが起こる。多くの実験では，水素，プロパン，重い液体などを充填した泡箱で，文字どおり数百万枚の写真を撮影する。

グレーザーが泡箱を思いついたのは，アナーバーにあるブラウンジャグというパブで，ビールの泡を眺めていたときだった，という逸話がある。本当かどうか尋ねたとき，彼は否定した。だが，一時期はビールを泡箱につめることも考えたようである。基本的に彼の出発点はウィルソン霧箱である。無論，質量が大きい(標的として効率的)という点で，泡箱のほうが素粒子物理学には向いている。1960 年，グレーザーはノーベル物理学賞を受賞した。

ドン(ドナルドの愛称)は女性にもてる。ノーベル賞とあいまって大変な人気である。



この写真は，セルンの大型泡箱（BEBC）内で起こったイベント（事象）を示している。飛び込んできたニュートリノが陽子と衝突すると，こういったイベントが起こる。基本的な反応は，陽子（陽子はアップクォーク２個とダウンクォーク１個を含んでいる）に含まれるダウンクォークの次の反応である。

ニュートリノ ＋ $d \longrightarrow$ ミューオン ＋ c

この時点で存在するのは，陽子中にあったアップクォーク２個とミューオンおよびチャームクォーク１個である。さらに陽子中のグルーオンから，ダウン－反ダウン対ができる。その反ダウンクォークが，チャームクォークと結合して，電荷が＋１の束縛状態である D^* になる。後に，ダウンクォーク１個とアップクォーク２個が残るので，再び陽子ができる。結果としては

ニュートリノ ＋ 陽子 $\longrightarrow$ ミューオン ＋ D^* ＋ 陽子

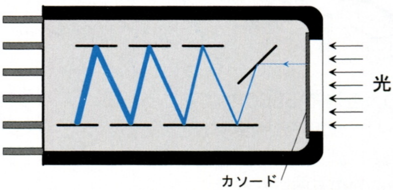
という反応が起きたことになる。チャームクォークは不安定なので，D^* は複雑な反応の末，すぐに正のパイ中間子２個と負の K 中間子１個に崩壊する。ニュートリノがやってきて，最初にぶつかった頂点で見られる反応である。

ニュートリノ ＋ 陽子 $\longrightarrow$ ミューオン ＋ 陽子 ＋ π^+ ＋ π^+ ＋ K^-

この K^- は，さらに反応を引き起こす。だが，経験を積んだ人でないと，何が起きているのかを理論的に理解するのは難しい。例えば，D^* はあまりにも短時間で崩壊するので飛跡は見えない。エネルギーと運動量の保存則も成り立っていなければいけない。それぞれの粒子の運動量は，飛跡の曲率から計算できる。単位は GeV である。はじめに入射してきたニュートリノのエネルギーはわからない。

の誤差でプランク定数を導き出すことに成功した。だが驚いたことに，当のミリカン自身でさえ光子の考えには反対だった。

技術的な面での大きな進歩をもたらしたのが，光電子増倍管だった。光電子増倍管で倍増されるのは光子ではなく，放出される電子のほうである。電場で加速された電子が陽極にぶつかると，その衝撃によって電子がいくつか放り出される。出てきた電子も電場で加速され，次の陽極に衝突してさらに電子を放り出す。この繰り返しによって，たくさんの電子ができる。このように，たった1つの電子でさえ，電子なだれのきっかけになる。この技術を使った光電管は，非常に感度が優れているので，たった1つの光子ですら検出することができる。

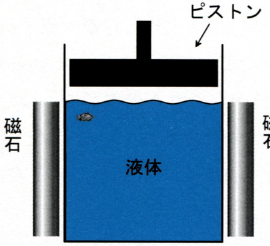


光電子増倍管は，現在，主に2つの用途で使われている。シンチレーション計数管の光検出器として，そして，チェレンコフ放射検出器としてである。光電子増倍管は，遠紫外線よりも大きなエネルギーをもつ光子の検出には使えない。

5.3 泡箱(バブル・チェンバー)

高エネルギー実験において，泡箱が一番重要な役割を果たしたのは，1953年から1973年である。開発したのは，ミシガン大学のグレーザーで1952年のことである。霧箱の自然な発展形と考えてもよいだろう。泡箱の原理の大部分は霧箱と共通している。では，原理を説明しよう。水か何か，液体があるとしよう。水の沸点は大気圧に依存している。高山に登ると，海面レベル(100℃)と比べて，格段に沸点が下がる。さて，気圧を変えることができるように，ピストンを付けた箱を用意して水を満たす。まず，ピストンを押そう。このとき，沸騰しないような温度に保っておくのを忘れないこと。では，箱に粒子を当ててみよう。粒子が通った跡には，イオン(と自由電子)が残る。ここでピストン

を上げると，液体の圧力が下がるので，液体は沸騰し始めるだろう。始めのうちは，乱れ，すなわちイオンのあるところで沸騰を始める。したがって，粒子の通った道筋に沿って小さな泡粒が現れる。全体が沸騰を始める前に写真に撮って，ピストンを下げると泡は消える。泡箱の原理を図解すると，こうなる（図には，後で述べる磁場も描いてある）。



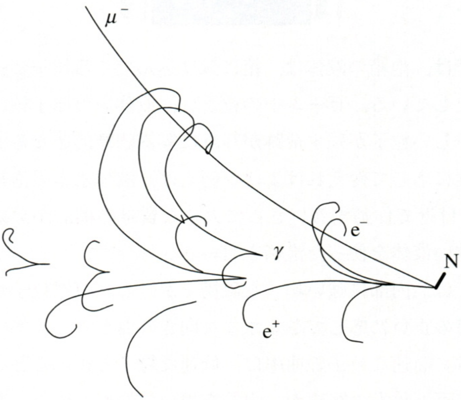
多くの実験では，泡箱の液体は，箱に飛び込んでくる粒子ビームの標的としての役割も果たしている。ビーム中の粒子は，液体中の原子核に衝突する。衝突で生まれる新しい粒子が残す飛跡が写真に写る。標的となる液体の種類は，観測したい過程に応じて変えればよい。例えば，液体水素の泡箱なら，水素の沸点（−253 ℃）付近で作動する。さらに大きな質量の標的が必要なら，液体プロパンなどの重い液体を使った泡箱を用いる。

多くの泡箱では，内部に強い均一な磁場をかける。荷電粒子が磁場の中を通過すると，電荷の正負に応じてさまざまな向きに曲がる。曲率は粒子の運動量によって異なる。高速な粒子の曲率は，低速な粒子と比べると小さい。

これまでに何百万枚もの写真が，泡箱を用いて撮影された。だが実は，写真を撮るより，解析するほうがはるかに難しい。一枚一枚，入念に調べて飛跡を測定しなければならないからだ。どんな粒子の飛跡かを判断する作業は，なかなか完全に自動化できず，大部分は手作業だった。写真には，たくさんのものが写っている。ありふれたイベント（粒子の衝突をイベントとよぶ）や，反応せずにビームのまま通り抜けていく粒子，飛跡と関係なく自然発生した泡など，さまざまだ。それでも，たくさんの粒子が写真から見つかった。特に，1970年代初頭に発見されたある種のイベントは，ゲージ理論が正しいことを示す画期的なものだった。このイベントが観測されたのは重い液体の詰まった大きな

泡箱に，ニュートリノビームを当てたときだった。後で詳しく説明するが，これが中性カレントのイベントである。

次の図は，重い液体を使った泡箱の中で観測されたイベントを，比較的，忠実に再現したものだ。どんなイベントでもそうだが，100% 確かな説明はできない。ここでは，最新の解釈を述べておく。このイベントは，ニュートリノ実験をやっているときに起こった。右からニュートリノが入射している。ニュートリノは中性なので飛跡を残していない。右端で原子核中の中性子と衝突して，このイベントが始まる。太く短い，右上を向いている飛跡が，原子核である。飛跡が太いのは，この原子核がたくさんの電荷をもつためだ。この重い液体(フロン)の原子核には，陽子が多数含まれているため，たくさんの電荷をもつことができる。強くイオン化されたこの飛跡を，N と書く。

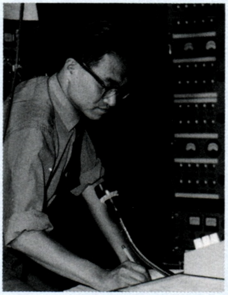


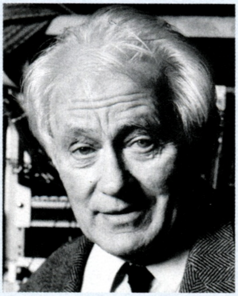
上向きで少し曲がった長い飛跡はミューオンである(μ^- と書いてある)。事実上，ミューオンは電磁相互作用しかしないので，泡箱の液体とはほとんど相互作用せずに通りすぎる。ミューオンは電子よりもはるかに重いので，制動放射を起こしにくいからである。ミューオンの特徴は，飛跡が長く，あまり原子核と相互作用をしないということだ。このことから，一般的なミューオンの見つけ方がわかる。いろいろな粒子が物質中をしばらく通過すると，ミューオンだけしか出てこない(ただしニュートリノはある)。時計回りに曲がるのは，負電荷の粒子である。ミューオンの寿命は比較的長く，たいていの場合，崩壊

する前に泡箱を通過してしまう。陽子，中性子やパイ中間子（図中にはない）などの粒子は，強く相互作用するので，かなりの確率でほかの原子核中の陽子や中性子などと衝突する。多くの場合泡箱内で衝突する。相互作用の型も，比較的典型的である。一般に，衝突からはいろいろな粒子がつくられるが，生まれてきた種々の粒子は，多かれ少なかれすべての方向に均一に飛び出していく。

残った飛跡のうち，目に見えるものはすべて，おそらく電子か陽電子だろう。電子の飛跡のうち，時計回りに曲がるものをe^-と表す。反時計回りに曲がるのは，多くの場合，陽電子なのでe^+と書く。これらの粒子が液体中を通過するとき，飛跡に沿って分子をイオン化しながら進むので，その分のエネルギーを失う。だから速度は遅くなり，曲がり具合（曲率）も大きくなって，最終的には停止する。

高エネルギーの光子は，一般にガンマ線とよばれている。原子核のすぐ近くを通ったガンマ線は，原子核の強い電場によって，ある決まった確率で，電子–陽電子対に変わってしまう。図中のγは，そのような対を表している。光子が，電子–陽電子対に変わるまでに走る距離は，光子自身のエネルギーと，通過していた物質によって変化する。この距離は確率分布として表されるので，毎回変わる。重い液体でつくった泡箱内では，そのような相互作用が起こる確率は非常に大きいので，ほとんどの光子を検出できる。一方，光子は相互作用する前に，ある程度の距離を走る。光子自身は泡箱内では見えないので，光子がつくられた場所と電子–陽電子対に変わる場所は，少し離れている。電子–陽電子対はV字の形で，とがったほうが，光子がやって来た方向を示している。対の片割れの電子がもつエネルギーは，陽電子のもつエネルギーと同じとは限らない。したがって，それぞれの飛跡の曲がり具合は異なることが多い。どちらか一方の飛跡が目に見えないほど短いと，ほとんど観測できないので，誤解を招くこともある。下のほう，真ん中からやや左側に1本だけ飛跡が出ているのは，おそらく，そのようなまぎらわしい現象だろう。もちろん，ほかの可能性もある。このようなイベントが初めて観測されたのは，1963年にセルンで行われた悲運なニュートリノ実験だったが，今日に至るまでしっかりとした説明はされていない。本質的には，いくつかの電子と陽電子，そしてミューオン1個だけが関わるこのイベントは，当時かなりの興奮を巻き起こした。だがそ





初めての放電箱をつくった**福井崇時**(Shuji Fukui, 1923)と**宮本重徳**(Sigenori Miyamoto, 1931), 多線式比例計数箱の発明者, **ジョルジュ・シャルパック**(Georges Charpak, 1924)。どちらの発明も, 素粒子物理学にとって限りなく重要である。放電箱発明の画期的な点は, 持続時間が非常に短いパルス高電圧を用いた点にある。1マイクロ秒の100分の1という短い時間だけ高電圧をかけるので, 放電は1か所だけで起こり, 箱全体に広がらない。そうしないと, 広い範囲で放電が起こるため, 荷電粒子がどこを通ったのかわからない。簡単に思えるが, この技術, 特にパルスの持続時間がわかるまでに, 1年間も実験を続けたそうだ。

放電箱がなければ, 1962年に行われたブルックヘブン研究所のニュートリノ実験は不可能だっただろう。技術の進歩が物理学の発展を支えた実例だ。放電箱が発明されるとすぐに, ニュートリノに2種類, つまり電子ニュートリノとミューオンニュートリノがあることが発見された。左側の写真は1963年, セルンのニュートリノ実験の計測室にいる福井で, 真ん中が宮本の写真である。

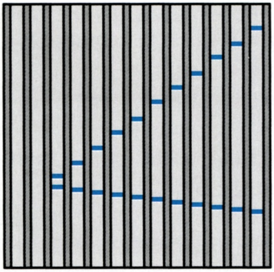
今日の実験にとって, 多線式比例係数箱はなくてはならない装置である。旧来の装置と比較すると, 格段にデジタル化しやすい上, イベント数が非常に多くなっても処理することができる。2007年頃に開始予定の大型ハドロンコライダー(LHC)での実験には欠かすことができない。

福井と宮本は, どういうわけかあまり広く知られていない。対照的なのが, シャルパックである。素粒子検出器, 特に多線式比例係数箱の発明と開発に対して, 1992年のノーベル物理学賞を受賞した人物だ。活気溢れるシャルパックは, フランスのテレビではすっかり有名人である。それがよかったかどうか, 今では彼自身も確信がもてないようである。いずれにせよ, 彼から聞いた話によると, コンドームから原子力エネルギーまで, 広い範囲の専門家として社会に受けとめられているらしい。後者, つまり原子力の専門家という肩書きのおかげで, 少々厄介なことになっているとか。くどいようだが, もしノーベル賞を受賞したら, メディアがどう思おうと, なんでも知っているような顔をしないほうがいい。

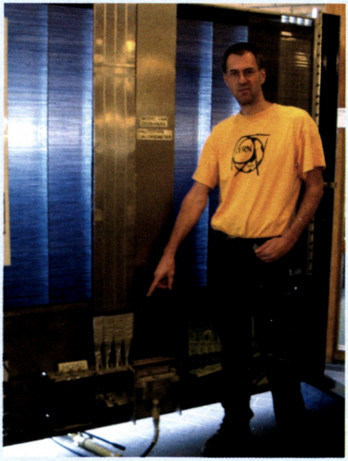
れ以後，似たようなイベントは二度と観察されていない。フランスの物理学者アニエス・ルクルトワ(Agnes Lecourtois)が，このイベントについて詳細な研究を行ったので，アニエス・イベントとよばれている。

5.4　放電箱(スパーク・チェンバー)

日本の物理学者，福井崇時と宮本重徳が開発した放電箱は，平行に並んだ金属板と，その間に封入された気体でできている。気体中を荷電粒子が通ると，イオン化された気体と電離電子が残る。金属板の間に高電圧を加えると，粒子が通過した跡に並んでいるイオンに沿って放電が起こる。一連の放電によって飛跡が見えるようになり，さらに写真も撮ることができる。金属板が粒子ビームの標的にもなる点は，これまでと変わらない。したがって，ビーム粒子が金属原子核に衝突したときの反応が研究できる。下の図は，中性の粒子が通った場合である。はじめは飛跡が見えないが，金属板中の原子核(ここでは３番目の板)に衝突すると，２次荷電粒子が２つつくられて２本の飛跡が現れる。



放電箱が泡箱よりも優れている点を書いておこう。第１に，パルス電圧を用いれば，非常に正確なトリガーがかけられることだ。シンチレーション計数管を使えばそのイベントが調べるべきものかどうかを判断することができる。調べたいイベントのときだけ，放電箱に電圧をかけて飛跡を調べればよい。こうすれば調べたいイベントだけを選んで写真を撮ることができる。第２に，比較的厚い金属板を使えば標的を非常に重くできることである。そうすれば，ニュートリノのようにすり抜けやすい粒子でも調べられる。





フランク・リンデ(Frank Linde, 1958)と**ヨース・エンゲレン**(Jos Engelen, 1950)は，アムステルダム大学，およびオランダ国立素粒子物理学研究所(NIKHEF)の素粒子実験物理学者だ。それぞれ，サンプリング・カロリメーターと結晶カロリメーターと一緒に写っている。サンプリング・カロリメーター(左)は，薄くて重い多数の金属板(鉄，鉛やウラニウム)の間に，シンチレーションを引き起こす物質を挟んでつくる。重い素材を使うことで，入ってくる粒子を減速する。粒子がシンチレーション物質中を通過すると光が出る。この光がプラスティック板を通って，リンデが指差している場所に集まっていく。光の強さは光電子増倍管で測れるが，発光したシンチレーション物質板の数に依存している。

電子と光子のエネルギー測定に使うのが，結晶カロリメーター(右)だ。この装置は大変高価である。結晶(左半分に見える赤味がかった物質)の中で，電子や光子がシャワーを引き起こし，出てきたシンチレーション光を，光電子増倍管で計測する。写真中のエンゲレン(2004 年現在 NIKHEF 所長)が見ている結晶カロリメーターは，ドイツ，ハンブルグにあるデジー研究所で，主にリンデが使っていたものである。反対にリンデが，エンゲレンが使っていたカロリメーターのそばに立っている。

カロリメーターは，大型加速器には欠かせない。磁場をかけると粒子のエネルギーに応じて軌道が曲がるので，普通，エネルギーを測定するときには磁場をかける。カロリメーターは，ある部分では磁場に取って代わろうとしている。エネルギーが非常に高くなると，曲率が極端に小さくなるので，磁場をかけてもエネルギーが測れなくなるからである。カロリメーターを使えば，粒子が集団となって飛んでくる場合(粒子のジェット)の全エネルギーが測定できる。

もうひとつ重要な測定装置が，カロリメーターである。サンプリング・カロリメーターは，検出装置によって隔てられた重い金属板でできている。使われる検出装置は，放電箱かシンチレーターだ。重い金属板の素材には，密度が十分高いものを使う必要がある。非常に高エネルギーの粒子(ニュートリノではないが，陽子や中性子など)を，原子核と衝突させるためだ。衝突すると粒子は遅くなる。衝突から生じる粒子も，十分高いエネルギーをもっているので，さらに反応が続行する。このように，数多くの放電やスパークが起きていく。その際に，発生する光の量を測れば，入射粒子のエネルギーもわかる。カロリメーターをつくるときに綿密に設計しておけば，入射粒子のエネルギーをかなり正確に測定できる。

5.5　多線式比例係数箱(プロポーショナル・ワイヤー・チェンバー)

放電箱内での事象をデジタル化する方法を発明したのが，セルンの技術者，F. クリーネン(F. Krienen)である。さらに彼は，磁気コア読み出しを用いてデジタル化したワイヤー・チェンバーを開発した。この発明を元に同じセルンのG. シャルパックは，多線式比例係数箱をつくりあげた。多線式比例係数箱は，飛跡に沿って生じる電離電子を用いている。放電箱では金属板だったが，多線式比例係数箱では，枠に電線をぎっしりと並べて張ってある。電線の間には電位差がつくってある。粒子が通過すると，気体がイオン化されたときに発生する電子が，小さな電子なだれを起こす。電子なだれが電線のほうに引き寄せられるときに生じる微細電流とその時間を正確に測定する。このようにして得た情報を元に，針金に直角方向の位置を1 mmの精度で決定することができる。通過した時間のほうも，10ナノ秒の精度で測ることができる(1マイクロ秒は100万分の1秒, 1ナノ秒は1マイクロ秒の1000分の1)。別の方向に電線を張った枠を同時に用いれば，粒子の飛跡をさらに精密に測定することができる。このときに，必要な電子技術は大変高度なものだ。それぞれの電線は増幅器などに繋がれている。イベントが観測されると，データは直ちにその場でコンピュータ処理される。以前と違って，写真すら撮らない。

6 加速器と貯蔵リング

6.1 エネルギー泡

ここで，素粒子が生まれたり消えたりする過程を理解するのに役立つ概念をひとつ，紹介しておこう。

エネルギー泡という概念だ。エネルギーが集中したとても小さな領域だと考えてもらえばいい。形はないが，それでもいくつかの性質がある。量子数の値と，泡のもつエネルギーと運動量である。例えば，電荷 2，全エネルギー 200 GeV (1 GeV＝1000 MeV)，運動量 0 の泡などがある。

エネルギー泡は，有限の確率で，いろいろな粒子の組み合わせに崩壊する。ただし，エネルギーと運動量の保存則および量子数の保存則で許される状態でなければならない[a]。泡が，それぞれの粒子の組み合わせに壊れる確率は，組み合わせによって変わる。ただし，特定の泡が，特定の組み合わせに壊れる確率はいつも同じである。

泡自体が運動している場合には，粒子をつくりだすのに必要なエネルギーは，全エネルギーから泡の運動エネルギーを除いたものになる。この点は重要である。運動している泡の壊れ方は，静止した泡が壊れる様子を動いている実験室から見るのと同じである。したがって，静止した泡が崩壊できない組み合わせには，運動している泡も崩壊できない。泡の運動エネルギーは，崩壊過程に関与しない。

---

[a] 実際には，角運動量保存則などほかにも多くの保存則があるが，むやみに複雑にするのはよそう。

素粒子自身も，一定の量子数をもつエネルギー泡である。その上，以前に説明したように，マスシェル上に存在する。つまり，素粒子のエネルギーと運動量の間には厳密な関係がある。だから，素粒子とは一定の質量をもつエネルギー泡だと考えることができる。そのほかに大きな違いはない。保存則が成り立つ範囲内なら，崩壊することもできる。崩壊は急に起きることも，ゆっくりと進むこともある。崩壊で生ずる粒子の組み合わせと，それぞれの組み合わせへ崩壊する確率によって決まるのだ。ある種の粒子は非常にゆっくり崩壊するので，崩壊する前にかなりの距離を走る。この場合は，泡箱などで直接観測することができる。例えばミューオンが崩壊するには，100 万分の 1 秒ほどかかる。それだけの時間があれば[b]随分長い距離を走ることができるので，貯蔵リングを 1 周することも可能である。ほかの粒子の場合はアッという間に崩壊してしまうので，軌跡が見えるほどは走らない。そういう場合に，その粒子が何だったかを見分けるためには，崩壊後に残る粒子を調べればよい。崩壊後にできた粒子のエネルギーと運動量をすべて足しあげて，どの粒子のマスシェルに一致するかを調べるのだ。多くの例を集めると，決まった粒子どうしの組み合わせが，いつも同じマスシェルに乗っているかどうかがわかる。エネルギーと運動量がわかれば，対応する質量も簡単にわかる。前に述べたエネルギーと運動量の関係を表すグラフに，運動量とエネルギーの値に対応した点を書き込んでいって，マスシェル曲線になるかどうかを調べればよい。マスシェル曲線になっていれば，今調べた特定の組み合わせに崩壊する新しい粒子を見つけたことになる。伝統的に，このような粒子は共鳴状態とよばれているが，本書では，より長寿の粒子との違いはないと考える。

明らかに，比較的質量が小さい場合を除けば，すべての粒子は不安定で崩壊する。質量 0 の素粒子以外で安定な粒子は，電子と陽子，そして，それらの反粒子だけだ。もちろん陽子はバリオン数が 0 でないので安定である。電子が光子やニュートリノに崩壊しないのと同じ理由だ。電荷は保存されなければならないが，電子よりも質量の軽い粒子は，質量 0 の素粒子で，電気的にはすべて中性である。そのため，電子は崩壊することができない。バリオン数というの

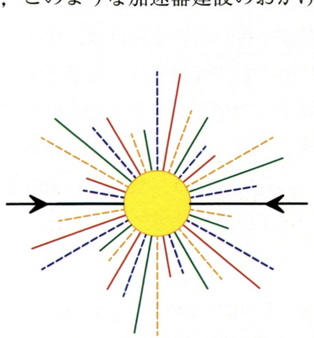
---

[b] 相対性理論によると，速く動いている粒子のほうが長生きする。おかげで，高速で走るミューオンが崩壊するまでに走る距離はとても長くなる。

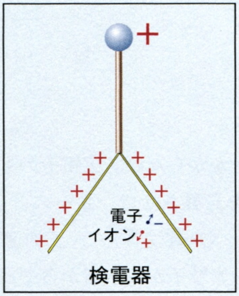
も量子数の一種で，陽子のバリオン数は 1 である。0 でないバリオン数をもち，陽子よりも軽い粒子は存在しない。だから陽子は安定なのだ。中性子は，陽子と電子と反ニュートリノに崩壊する。ここでも，電荷は保存されることに注意しよう。始状態の中性子は電荷 0 だが，終状態でも，陽子(電荷 1)と電子(電荷 −1)の電荷を加えるとやはり 0 になる。

中性(電気的)の粒子は軌跡を残さないので，間接的にしか観察できない。強く相互作用する中性の粒子は，通常は，すぐに原子核と衝突してしまう(多くの場合，その原子核を破壊する)。その結果，たいていの場合は，いくつかの荷電粒子が放出される。反対に，中性の粒子のほうが崩壊することもある。その場合，崩壊で生じた粒子が電荷をもつならば観測可能だ。ただし，光子の場合は特別である。光子が(気体や液体などの)物質中を通過すると，(原子から放り出された)単独の電子や電子-陽電子対がつくりだされ，それらが観測されることになる。

新しい粒子をつくるには，できるだけ高エネルギーのエネルギー泡をつくらなければいけない。そのような泡は，衝突の結果として生まれる。泡をつくった後に何が出てくるかは，少し待たなければわからない。どんな粒子でも，保存則と矛盾しないかぎり，ある一定の確率でつくりだされる。確率がとても低い場合には，観測不可能なこともあるけれど。ともかく基本的な手順は，粒子を最高エネルギーまで加速して別の粒子と衝突させることである。下の図を見てほしい。世界中のいろいろな高エネルギー研究所で行われている実験の本質を示してある。歴史的に見ても，加速器の発展はすばらしいとしかいいようがない。素粒子物理学は，このような加速器建設のおかげで飛躍的な進歩を遂げ









ビクトル・ヘス(Victor Hess, 1883-1964, 1936年ノーベル賞受賞)と**テオドール・ウルフ**(Theodor Wulf, 1868-1946)。宇宙線を発見した物理学者達だ。ファルケンブルグ(Valkenburg)にあるイエズス会のカレッジ教師だったテオドール・ウルフは，1910年，高感度の検電器(ウルフ検電器)を製作した。当時，検電器のような装置を帯電させてから，しばらく置いておくと，徐々に電荷を失っていくことがわかっており，地球からの放射線によるものと考えられていた。すでに，検電器のような装置に放射能を浴びせると放電することも知られていたからである。フランス人物理学者，ランジュバン(Langevin)の助けを借りたウルフは，エッフェル塔の頂上で実験を行った。細心の注意を払った末の解析結果は，意外なものだった。地球からの放射線は大気に吸収されるので，高いところに行けば放電しづらくなるだろうという予想を上回る速度で，検電器が放電してしまったのである。

検電器は，とても単純な装置である。電気を通す金属箔2枚からできている。装置を帯電させると，これらの金属箔は反発し合って，図のように開く。荷電粒子がそばを通過すると，原子から電子を弾き出す。そのときに，できたイオンや電子が金属箔のほうに移動して放電を引き起こすので，金属箔は元に戻る。

この現象を系統的に研究しようと決意した人物がヘスだった。彼が実験を始めたのは，ウィーンにある牧草地である。気球に乗ったヘスは，ウルフ検電器を地上から5kmの高さまで持ち上げた。夜間飛行数回，太陽を遮蔽するために日食時に行った飛行など，合計8回(時には無人飛行)に及ぶ飛行の結果，検電器の放電は地表付近よりも高い上空のほうが速いことがわかった。そしてヘスは，この現象は宇宙からの放射線によって起こると結論した。後に参入したミリカンは広報の才があり，宇宙線という名前をつくりだした(それ以前の，超放射という名前にとってかわった)。初めは自分自身の実験に基づいてヘスの結果を疑っていたミリカンだが，後に態度を変えた。そして，ヘスよりも著名な人物として世間に知られるようになる。だがスウェーデン王立アカデミーは事実を正しく認識し，1936年のノーベル物理学賞の半分を，宇宙線発見の功績を称えてヘスに授与した(残り半分はアンダーソンに授与された)。本来なら，ウルフにも受賞させるべきだったと私は思っているけれど。

てきたのである。

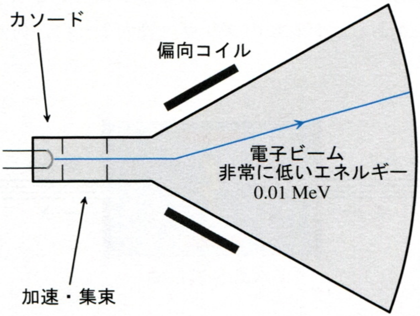
6.2 加 速 器

最大の加速器建設には1円もかからない。宇宙そのものなのである。エッフェル塔におけるウルフの実験を発展させた，オーストリアのヘスは1911年に宇宙線を発見した(1936年ノーベル賞受賞)。人工加速器で得られるよりもはるかに大きなエネルギーをもつ素粒子が，宇宙からやってくるのだ。宇宙線で測定された最高エネルギーは10^{21} eVに達する。人間がつくりだせる最高エネルギー(2 TeV。1 TeVは1000 GeV，1 GeVは1000 MeVである。電子質量は0.5 MeV，陽子質量は約1 GeVだ)の10億倍である。これらの宇宙線粒子は，宇宙でつくりだされ，加速され，気の遠くなるような長い旅をして地球に到達する。どこから来るのか，そしてどこでエネルギーを得ているのか，誰も知らない。たいていの宇宙線粒子は，はるか上空で大気と衝突して，2次粒子や3次粒子を次々につくりだす。広範な領域にわたってシャワー状に降ってくるそれらの粒子を，我々が地球表面で観察するわけである。素粒子物理学の発展において宇宙線が果たした役割は大きい。現在でも，宇宙線を用いた大実験が行われたり計画されたりしている。陽電子は，1932年にカルフォルニア工科大学のアンダーソンによって宇宙線の中から発見された。ミューオンやパイ中間子，さらにK中間子も1950年代に宇宙線のなかで発見されている。宇宙線の厄介な点は，実験を完全に制御することができないことだ。地表に最初にやってきた粒子が何であって，最初のエネルギーがどんな値だったのかは誰にもわからない。その粒子は宇宙から来たのかもしれないし，あるいは，2次粒子のひとつという可能性もある。だから系統だった研究は難しい。この点は，完全な制御が困難な実験に共通する問題である。今日でも太陽からのニュートリノや宇宙線からのニュートリノに関しては，このような意味で，問題点を明らかにするのが大変である(問題点とは，ニュートリノが混合しているか，それが質量をもつかということだ)。

繰り返すが，素粒子加速器という魅力的なテーマに興味がある人は，別のしっかりした本を読んでほしい。本書では，概要だけを述べるつもりである。

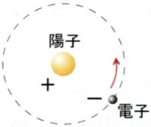
テレビやコンピュータ画面に画像を映し出すブラウン管は，実は加速器を内

蔵している。電子はブラウン管の中で，加速され，曲げられてからスクリーンにぶつかって光を出す。下図の左側に示したように，ブラウン管の中では，カソードとよばれる物質が加熱されている。加熱されたカソードからは，電子が飛び出してくるが，何も起こらなければ元に戻る。だが，数千ボルトの電場がかかると，飛び出した電子はカソードから引き離されて加速される。そして，偏向コイルでつくられた磁場によって曲げられる。曲げられた電子のビームはスクリーンに向かって動いていく。スクリーンに衝突した電子は，テレビの画面上に映像をつくりだす。こうして映し出された映像を，我々は何もすることがないときに楽しんでいるのである。

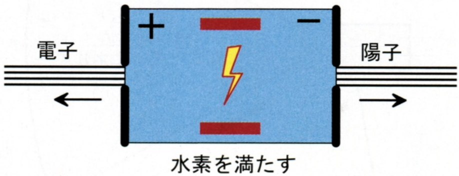


このように，テレビのブラウン管内にも加速器が入っている。といっても，加速器としてのエネルギーは，かなり低い。電子のもつエネルギーは，電子ボルトという単位で表す。1ボルトの電圧差のある電場を通り抜けて加速された電子は，1電子ボルト(eVと表す)のエネルギーをもつ。テレビのブラウン管内の電圧差は10000 V程度だ。つまり，ビームに含まれる電子がスクリーンに衝突するときのエネルギーは10000 eV (10 KeV)ということだ。素粒子物理学では，MeVという単位を使う。1 MeVは1000 000 eVだ。だからテレビのブラウン管内の電子のエネルギーは，通常，0.01 MeVである。

どんな陽子加速器の出発点もイオン源だ。水素をいっぱいに詰めた箱でもよい。もっとも単純な原子は水素原子である。次ページの図のように，陽子1個からなる原子核と周りを回る電子1個からできている。



次に，この箱の中で強力な放電を起こす。この放電によって原子がイオン化され，電子が原子から放り出される。残った原子，つまり電子の抜けた原子はイオンとよばれる。水素の場合には単なる陽子である。最終的には放電の起きた道筋に沿って，自由電子と陽子が残る。何もしなければ，電子は陽子と再結合し，再び水素原子をつくる。ここで電場をかけて，電子や陽子を箱から取り出して加速器に入射させることもできる。もちろん電子を取り出すだけなら，もっと簡単な方法がある。テレビのブラウン管のように，何か物質を熱するだけでよい。



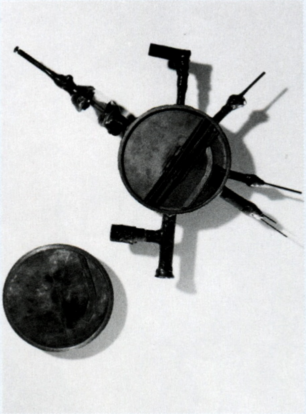
初めてつくられた加速器は，線形加速器だった。非常に強い電場によって陽子や電子を加速する仕組みだったので，主な目標は可能なかぎり高い電圧を得ることだった。この種の加速器でもっとも有名なのは，バン・デ・グラーフ型加速器とコッククロフト-ウォルトン型加速器である。この方法では最高1500万ボルト程度を達成することができた。つまり，粒子を15 MeVのエネルギーまで加速できた。15 MeVより小さな質量の粒子は少ないので，これはたいしたエネルギーではない。実は，質量0の粒子を除けば，15 MeVより小さな質量をもつのは電子だけだ。これらの加速器は原子核物理学の研究に用いられたが，新粒子発見には何の役割も果たさなかった。

次につくられた加速器はサイクロトロンである。1930年に，カリフォルニア大学バークレー校のローレンスが初めてつくった。この装置は真ん中で2つに分かれた円形箱でできており，円形箱に垂直な磁場がかけてある。2つの半円の間には電場がかかっており，陽子を箱の真ん中に入射させると回転を始め

ジョン・コッククロフト(John Cockcroft, 1879-1967)と**アーネスト・ウォルトン**(Ernest Walton, 1903-1995)。原子核物理学実験の発展に大きな影響を与えた初めての加速器をつくった2人である。彼らが最初に観測したのは，リチウム原子核に陽子を衝突させたときの分裂反応だった。リチウムの原子核は陽子3個と中性子4個からなっている。入射する陽子と合わせると，α粒子2個分である。α粒子は，陽子2個と中性子2個からできている。彼らがどのようにして，この反応を立証したかについて読むのは実におもしろい。まず彼らは，この反応から2個のα粒子が同時に出てくることを，示さなければならなかった。そのために，彼らは2名の人物に，それぞれα粒子が当たると光るスクリーンを観察させた。2人には，光が見えたらキーを押すようにいっておく。2人が同時にキーを押すことがあれば，つまりリチウム原子核が崩壊したということだ。

この実験において，彼らは，陽子を約70万電子ボルト(700 keV)まで加速した。今日の基準から見ると相当低いエネルギーだが，原子核研究のためなら，この程度でも十分役に立つ。ウォルトンは，少なくとも1951年まで(ノーベル賞記念講演を見よ)，この方法で陽子を10 GeV(別の単位で表すと10000 MeVまたは10 000 000 keV)まで加速できると，楽観的に考えていたようである。見解が甘すぎる。陽子を加速するなら，シンクロトロンのような円形加速器のほうが適当である。おもしろいことに，実はたいていのテレビには，20-30 keVの電圧を得るためにコッククロフト-ウォルトン型高電圧発生装置が入っている。さらにコッククロフト-ウォルトン装置は，巨大陽子加速器においても，イオン源に一番近い加速器として，今なお使われ続けている。

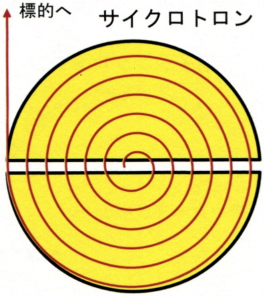



アーネスト・ローレンス(Ernest Lawrence, 1901-1958)　1939 年のノーベル賞を手にしたローレンスは，1929 年にサイクロトロンを発明した人物である。1 枚目の写真で両手にもっているのが初めての試作品だ。この機械は，1930 年秋に大学院生のミルトン・スタンレー・リビングストン(Milton Stanley Livingston, 1905-1986)とつくったものだ。2 枚目の写真に細部が写っている。この機械を使うと，80 keV (0.08 MeV)まで粒子を加速できる。時代とともに，次々に巨大なサイクロトロンが開発され出した。原子核物理学に向けた資金が潤沢になったせいもあって，第 2 次世界大戦後，この傾向はいっそう強くなった。アメリカにおける最高峰が，シカゴ近郊にあるフェルミラボである。フェルミラボでは，1 TeV，つまり 1 000 000 MeV まで陽子を加速している。

なんといっても，ローレンスはアメリカのすべての加速器建設グループの生みの親である。彼の育てた人達が，フェルミラボ，ブルックヘブン，スタンフォード近郊にあるスラック，そしてシカゴ近辺にあるアルゴンヌの加速器を建設した。ローレンス自身は，ノルウェー出身のロルフ・ヴィーデロー(Rolf Wideröe, 1902)の教え子である。ヴィーデローは加速器の最初の設計者とよばれる人物で，自分自身で加速器をつくっただけでなく，ローレンスや電子-陽電子コライダーを初めて開発したトウシェクにアイデアを吹き込んだ。

サイクロトロンにとって決定的なアイデアは，粒子が 1 周するのにかかる時間は，粒子の速さによらないということだった。粒子は，速さが遅いときには半径の小さな円を回り，円板の端に近づくと大きな円を描くために速く回るようになる。そのため，1 周するのにかかる時間は変わらない。初め実験で見つかり，すぐ後に理論的に理解されたこの原理が，サイクロトロンの普及を支えたといってよいだろう。サイクロトロンの原理は，加速器の歴史の中で際だって重要な発明といわれている。

る。磁場で軌道が曲げられるためだ。陽子が片側の半円にすべて集まるときにタイミングを合わせて，うまく電圧の向きを入れ替えると，陽子が片方の半円から反対側の半円に移動するときに加速することができる。陽子が加速されると円運動の半径は次第に大きくなり，最終的には装置から飛び出していく。これらすべての過程を通して，磁場は一定に保っておく。

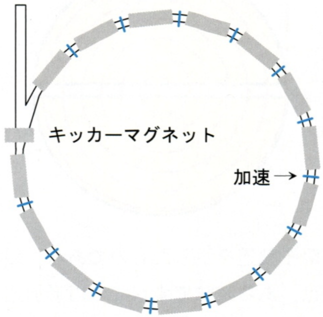


上の図は，加速中の陽子軌道を示したものである。磁場は紙面と垂直方向に向いている。この装置は，ある意味ですべての円形加速器の祖先に当たる。粒子に円運動をさせるために，磁場をかけて軌道を曲げる。そして特定の場所で何度も繰り返し加速する。ここに図示したサイクロトロンでは，2つの半円の間隙を陽子が通過するときに加速する。

サイクロトロンで加速できる最高エネルギーは約 1 GeV（＝1000 MeV）である。その場合の加速器は約 4×4×4 m の箱に収まるくらいだが，エネルギーが高くなると装置も大きくなるので，必要な大きさと強さをもつ磁石をつくるのが難しくなる。

1 GeV 以上に加速するには，粒子を半径一定の軌道上を回し，磁石もその円周上に固定する。そして粒子が速くなるのに合わせて，磁場を強くしなければならない。そうすれば，円周上に置いた細いパイプの中でビームを回すことができる。磁石はビームパイプに沿って並べ，特定の場所で電場をかけて加速する。この操作を実現するには，多くの優れた発明が必要だった。たくさんの粒子を，しっかりと束ねて，高いエネルギーまで加速するのは簡単ではない。遅い粒子が集団から落ちこぼれないように，また速い粒子が集団から飛び出してしまわないように，また横に逸れそうになった粒子がはぐれてしまわないよう

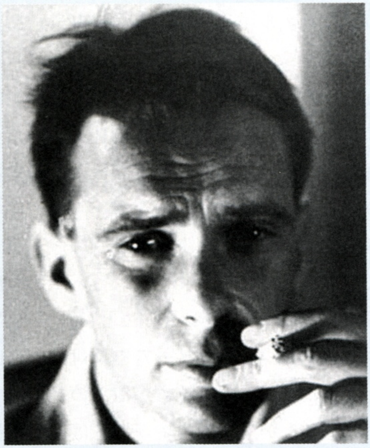
にするには，さまざまな工夫が必要である。とりわけ重要だったのは，粒子がビームパイプから出ないように磁石を配置する，強収束とよばれる方法である。この種の加速器はシンクロトロンとよばれる。1960年までに，大きな陽子シンクロトロンが2台つくられた。ブルックヘブン(ニューヨーク近郊のロングアイランド)のAGS(強収束シンクロトロン)と，スイスのジュネーブにあるセルンのPS(陽子シンクロトロン)だ。どちらも半径は200 m程度である。



上の図はシンクロトロンの概略を示している。円周に沿って，たくさんの磁石がある。それらの間隙(直線部)に電場をかけて，粒子を加速する。粒子のエネルギーが高くなると，磁石を流れる電流も増加する。最高エネルギーに達すると，粒子を加速器から実験装置のほうに送り込むために，粒子取り出し用の磁石(キッカーマグネット)が動き出す。

シンクロトロンは巨大化の一途をたどり，今日でもその勢いは衰えていない。その点は，本章の別の節でふれることにする。

通常，これらのシンクロトロンでは陽子を加速する。電子のような軽い粒子は，磁場で曲がるときのエネルギー損失が大きいからだ。荷電粒子の軌跡が直線でなくなると，電磁波の放射が起こる。一番簡単な例はアンテナだ。アンテナの中で振動した電子はラジオ波(電磁波の一種)を放射する。円軌道を描く粒子も電磁波の放射を起こすが，この現象をシンクロトロン放射という。電磁波がエネルギーを持ち去るので，粒子はエネルギーを失って減速する。円形加速器の場合，電子は同じエネルギーの陽子よりもはるかに多くの電磁波を放射す



ブルーノ・トウシェク(Bruno Touschek, 1921-1978)　オーストリア生まれのトウシェクは，ハイゼンベルグの下で研究に取り組み，やっとのことで第 2 次世界大戦を生き延びた。生母がユダヤ人だったので，常にナチスに逮捕される恐怖におびえる毎日だった。何人かの物理学者の協力のもとに逃亡生活を送ったが，1945 年，ついにゲシュタポに捕まって投獄された。頻繁に訪れたロルフ・ヴィーデローと彼は，ベータトロンとよばれる新型の加速器について話し合ったらしい。1945 年 2 月末，トウシェクはキール近郊の集合キャンプに移送された。病身の上，本がぎっしり詰まった重い荷物を背負った彼は，行進途中の郊外で地面に倒れこんだ。銃を抜いた親衛隊将校は彼の頭に向かって発砲し，負傷して血まみれの彼を溝の中に置き去りにした。なんとこのとき，彼は左耳のうら側を負傷しただけだった。病院にたどり着いた彼は監獄に戻され，英軍の手で釈放された。

さまざまな場所，特にグラスゴーで働いた彼が最後に住んだのはイタリアだった。1960 年，トウシェクは，電子と陽電子を同じリングの中で反対向きに走らせる，初の電子-陽電子衝突型加速器を提案する。ところが実は，1943 年の段階でロルフ・ヴィーデローがコライダー(衝突型加速器)のアイデアを提案しており，特許まで取っていた。だが，1 つのリングに 2 本のビームを通すことを思いついたのはトウシェクで，彼はその線に沿った加速器(AdA)を建設した。

不幸なことに，トウシェクは酒と煙草を愛しすぎていた。1978 年，彼はスイスで早すぎる死を迎える。彼の死とともに，物理学界は計り知れない影響を残した偉大な人物を失ったことになる。

彼については，セルンの出している黄表紙レポート 81-19，*The Bruno Touschek Legacy* も参考になる。

る。放射量は粒子のもつエネルギーではなく，速度に依存しているからである。陽子は電子の 1800 倍も重いので，陽子と同じエネルギーをもつ電子の速度は，陽子に比べるとはるかに光速に近い。だから半径が一定の加速器を使うかぎり，陽子は電子よりもはるかに高いエネルギーまで加速できる。ところで陽子衝突の物理学は，電子衝突の物理学とは大幅に異なったものである。その点がヒッグス粒子発見の決め手となる要因かもしれない。

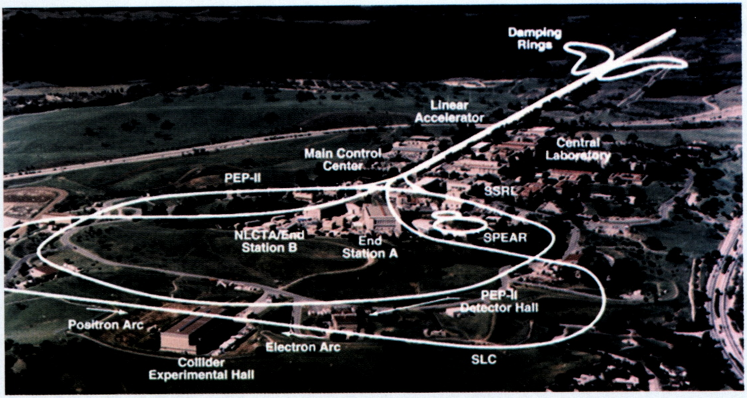
もうひとつ，根本的な飛躍的進歩が生じた場所は，イタリアのフラスカティにある研究所だった。1961 年にブルーノ・トウシェクは貯蔵リングを 1 つだけもつコライダー（衝突型加速器）をつくることに成功した。この種のコライダーでは，逆符号の電荷をもつ 2 本のビームを反対向きに回し，数箇所で交差させて衝突させる。片方のビーム中の粒子が他方のビーム中の粒子に衝突すると，エネルギー泡が生まれるが，そのエネルギーは双方の粒子のエネルギーの和，つまり 2 倍になる。静止した標的に加速した粒子を衝突させる実験で生ずるエネルギー泡のエネルギーは，ビーム中の入射粒子がもつエネルギーよりもはるかに小さい。標的粒子が跳ね返されるので，全エネルギーの多くはエネルギー泡の運動（泡の運動エネルギー）に使われてしまい，泡自体のエネルギーはあまり大きくならないためである。

例えば，静止した陽子（陽子の質量は 0.938 GeV≈1 GeV）に 900 GeV の粒子をぶつけても，生じる泡のエネルギー自体は 41 GeV にすぎず[c]，残りの 859 GeV は泡が走るときの運動エネルギーとして使われる。コライダーの場合には，衝突で生じる泡が静止しているので，泡全体の運動にエネルギーが使われることはない。したがって，すべてのエネルギーを新しい粒子をつくるために使うことができる。

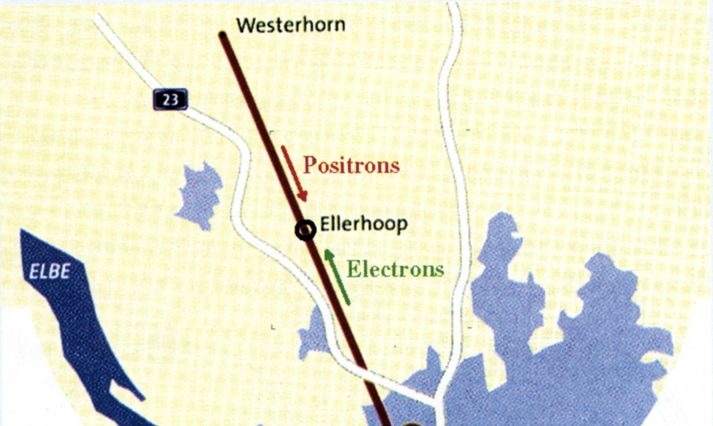
もちろん，コライダーにも不利な点はある。標的を自由に選ぶことはできないし，衝突が起きる確率がかなり小さい。粒子にとっては，ビームは気体のようなものなので，ビームどうしをぶつけても何も起こらずにすり抜けてしまうことが多いからだ。要するに，コライダーの大問題はルミノシティをいかに高めるか，つまり，いかにしてビームの中にたくさんの粒子を詰め込み，かつ小さく束ねて濃縮するかということである。まるで，2 本の針の先端どうしをぶ

---

c　式を書いておくと $41 \approx \sqrt{2 \times 900 \times 0.938}$



サンフランシスコ近郊のスタンフォードにあるスラック(SLAC)の航空機からの眺望。



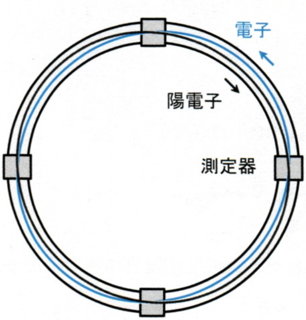
テスラ(TESLA)の模式図。各々が 15 km にわたる線形加速器 2 本を備えており，目標とするエネルギーは 500–800 GeV である。

つけるようなものである。旧式の加速器では，標的に静止している普通の物質を用いてきた。普通の物質は単位体積中に非常に多くの粒子を含むので，ビームが来ると，かなり頻繁に衝突が起きていた。さらにコライダーの場合，衝突によってつくられる2次ビームの強度を高くすることができない(下を見よ)。だから概して，非常に強度の高い2次ビームを必要とするニュートリノ実験などは不可能である。

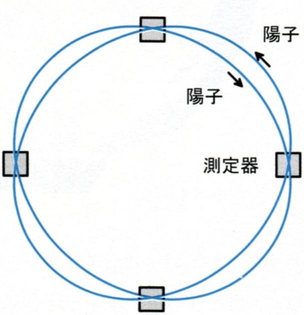
コライダーには3種ある。1リング型，交差リング型，リニアコライダー(線形衝突型加速器)である。

1リング型のコライダーでは，粒子と反粒子を反対方向に走らせる。例えば電子と陽電子をぶつける場合，同じ電場と磁場で，電子と陽電子を同時に加速することができる。電子と陽電子は同じ電場で反対向きに加速され，同じ磁場で反対向きに曲がるからである。少し面倒なのは，加速している間は電子と陽電子のビームを離しておき，いくつかの衝突点でしか衝突しないようにする必要があることだ。陽電子は対生成で簡単につくることができる。実際，最初につくられた1リングの衝突型加速器は(考案者はトウシェクでAdAとよばれている)，250 MeVの電子と陽電子を用いたもので1961年に完成した。

交差リング型のコライダーにはリングが2つあるので，電荷が反対の粒子どうしを衝突させる必要はない。だから両方のリングに陽子が入れられるので，電子に比べてはるかに高いエネルギーまで加速することができる。今のところ，電子-陽電子衝突の最高エネルギーは209 GeVだが(104.5 GeVのビーム2つの衝突)，陽子-反陽子の衝突エネルギーは2000 GeV (フェルミラボ)に達して



単一リング型コライダー



交差リング型コライダー

いる。200 GeVの電子–陽電子コライダーはセルンにあり，レップ(LEP)とよばれている†。

今では，コライダーに使えるくらい大量の反陽子をつくることが可能になっている点にもふれておこう。実に巧妙な発明の産物である。1984年のノーベル賞はルビアとファン・デル・メーアに授与されたが，その受賞理由のひとつは，まさにこの技術的開発だった。この陽子–反陽子衝突型加速器によって達成された物理学上の成果が2種類のベクトルボソン，WとZの発見だ。

リニアコライダーも，衝突型加速器の一種である。基本的には，2台の線形加速器を向かい合わせに置いて，お互いに撃ち合う形だと考えればよい。これまでに建設済み，あるいは建設が予定されているリニアコライダーは，すべて電子と陽電子を衝突させる装置である。粒子の軌道が曲がっていないので，シンクロトロン放射によるエネルギー損失はほとんどない。ただし粒子が端から端まで1回走る間に加速しなければならないので，線形加速器は非常に長くなることが多い。もっとも重要なリニアコライダーはスラックにつくられたものだが，この装置には，厳密にいうと直線でない部分もある。1つの線形加速器を用いて陽電子と電子の両方を加速し，それぞれ半円形を描かせ，最後に正面衝突させる仕組みになっているからだ。さらに，1リング型の電子–陽電子コライダーのスペアー(SPEAR)とペップ(PEP)も併設された。

ハンブルグのデジー(DESY)ではテスラ(TESLA)，セルンではクリック(CLIC)というリニアコライダーが企画されている(承認されてはいない)。それぞれ線形加速器を2本ずつ備え，500–800 GeV，そして1000–3000 GeVで衝突させる計画である。そのためにはビームを極端に小さく絞って(1ミクロンよりはるかに小さい)，非常に精確に衝突させる必要がある。驚くほかない。

6.3　2次ビーム

静止標的の中には，たくさんの陽子が入っている。例えばセルンの陽子シンクロトロンは，1963年には，25 GeVの運転によって10^{12}個ほどの高エネルギー

---

† (訳者注) LEPは2000年まで稼働したが，現在はLHCとよばれる陽子–陽子コライダーへの改造が行われている。

陽子を3秒ごとに産出していた。標的中の粒子と衝突することによって，ある粒子が100万分の1の確率でつくられるとすると，3秒ごとに100万個近く得られることになる。当時の標準技術は，加速器から出てくる陽子を標的に当てることだった。標的には，ベリリウムや銅，タングステンなどの金属を用いることが多かった。陽子が標的中の原子核に衝突すると，たくさんの粒子ができる。磁石や遮蔽材を置いておけば,特定の種類の粒子を選び出すこともできる。2次ビームはこのようにつくりだされていた。特に重要だったのは，パイ中間子とK中間子だ。ほかの粒子については別のところで論ずるとして，しばらくは，これら2種類の粒子について説明しよう。パイ中間子やK中間子が素粒子のリストにあがっていないのは，それらの粒子がクォークと反クォークの束縛状態だからだ。組み合わせを表にしてみよう。

名前	記号	クォーク	電荷	質量(MeV)
正電荷パイ中間子	π^+	$u\bar{d}$	+1	139.57
中性パイ中間子	π^0	$u\bar{u}$と$d\bar{d}$の混合	0	134.98
負電荷パイ中間子	π^-	$d\bar{u}$	−1	139.57
正電荷K中間子	K^+	$u\bar{s}$	+1	493.68
中性K中間子	K^0	$d\bar{s}$	0	497.67
中性反K中間子	$\overline{K}^0$	$s\bar{d}$	0	497.67
負電荷K中間子	K^-	$s\bar{u}$	−1	493.68

表からわかるように，π^+とπ^-は，お互いに反粒子の関係にある。K^+とK^-とK^0と$\overline{K}^0$も同様である。粒子と反粒子の質量は常に等しい。π^0は自分自身が反粒子である。

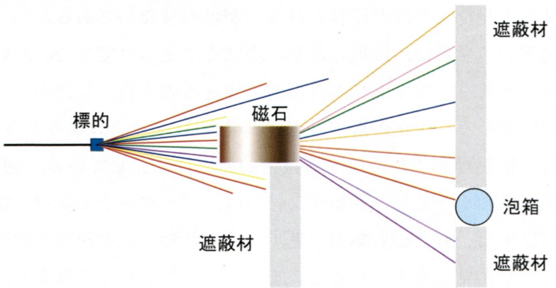
クォークの色についてもふれておこう。クォークと反クォークの組み合わせの場合，クォークがある色をもてば，反クォークはその反色をもつようになっている。例えば正のパイ中間子は，u_rと$\overline{d}_r$，u_gと$\overline{d}_g$およびu_bと$\overline{d}_b$の束縛状態が混ざった状態である。

パイ中間子は，質量135 MeV程度(繰り返すと，電子は0.511 MeV，陽子は938 MeV)の比較的軽い粒子である。パイ中間子のバリオン数は0なので，陽子はパイ中間子に崩壊することはできない。パイ中間子には3種類あり，それぞれ電荷は異なるが質量はほぼ等しい。π^0は非常に早く崩壊してしまうので，2次ビームをつくるわけにはいかない。π^+はほとんどが正電荷のミューオン

μ^+とミューオンニュートリノに崩壊し，平均寿命は100万分の2秒ほどである。これだけあればπ^+は，100 m ほど走ることができる。もちろん，実際に走る距離はパイ中間子のエネルギーによって変わる。相対論の効果を無視すれば，光速(3×10^{10} cm/秒)に近い速さで走るパイ中間子は，崩壊するまでに約5.4 m走る。相対性理論によれば，速く走る粒子の寿命は長くなる。エネルギーが1.3 GeVのパイ中間子は，静止質量の10倍のエネルギーをもつので，時間も10倍長くなる。したがって，このエネルギーのパイ中間子は平均すると54 m走る。

K中間子には4種類ある。電荷を帯びたK中間子の寿命は，パイ中間子のおよそ半分で，1.23×10^{-8}秒である。中性のK中間子(K^0と$\overline{K}^0$)の場合には，これら2種類の中間子の混合という重要な因子のおかげで，かなり複雑になる。とにかく混合によって，寿命の短いK_Sと寿命の長いK_Lに分かれることになる。K_Sの寿命は電荷をもつパイ中間子の約300分の1だが，長生きのK_Lのほうは同じパイ中間子の2倍である。つまり，K^+，K^-，K_Lは2次ビームとして使うことができるということだ。どの粒子も，陽子を標的に衝突させるだけでたくさんつくることができる(パイ中間子のほうが軽いのでずっと多くできる)。それらを集めれば，ほぼ一定のエネルギーを保つビームがつくりだせる。

荷電粒子(電荷をもつ粒子)の軌道は，磁場の中で曲がる。曲がり具合は粒子の運動量の大きさによって変化し，運動量(したがってエネルギー)が大きいほど，曲がり方は小さくなる。この性質を利用して，一定のエネルギーをもつ荷電粒子を，磁石を使って選び出すこともできる。磁石から一定の角度の所に実



験装置を置けば，一定のエネルギーをもつ粒子だけを集めることができる。ほかの方向に飛んだ粒子は遮蔽材で止められる。図には非常に単純化した装置を示した。

1960年代にはK中間子を使った泡箱実験が盛んだった。典型的な実験では，例えば，エネルギー5 GeVの荷電K中間子が泡箱の中で相互作用する写真を，10万枚から数100万枚撮影した。この反応では，質量が500 MeV以上の不安定な新粒子がたくさんできた。だが，これらの新粒子を分類するために費やされた多くの時間と努力は，今では歴史的な意味しかもっていない。現在では，すべてが基本粒子であるクォークと反クォークの束縛状態として理解されているからである。ちょうど，パイ中間子やK中間子，それに陽子や中性子と同じように。

ニュートリノのビームも同じようにつくられるが，この場合は，むしろ3次ビームとよぶほうがよいかもしれない。陽子と標的の衝突では，ニュートリノが直接つくられるわけではない。たくさんできたパイ中間子やK中間子はすぐに崩壊するが，そのときにニュートリノがつくられるのである。このニュートリノを集めてニュートリノ実験を行う。ニュートリノは電荷をもたないので，特定の運動量をもつニュートリノを取り出すために，磁石は使えない。

6.4 加速器建設家

素粒子物理学の進歩を支えたのは，研究所の所長や加速器の技術者，応用物理学者からなる一群の人々だ。つまり実験を可能にする装置や加速器をつくってくれた人々である。これらの人々の大部分は，脚光を浴びることはない。最後に実際の発見をした人だけが注目されるのが世の常なのである。

素粒子物理学の発展は，技術の進歩に根強く支えられてきた。たいていの技術の発展は，どんなものであれ，直接的に加速器の改良，したがって新しい実験に結びついている。現在の素粒子実験の場合は，マイクロエレクトロニクス，物性物理，低温物理および関連する技術的発展に依存している。過去50年にわたる電子工学のすさまじい進歩がなければ，ワイヤーチェンバーなど実現不可能だったはずだ。もっとも劇的な進歩が見られたのは加速器の開発だろう。

何が起こったか見てみるとしよう。まずサイクロトロンではなく，固定標的

加速器といわれるものの発展から始めよう。この加速器では，陽子ビームを加速し，加速器から取り出して標的に衝突させる。前に説明したように，大部分のエネルギーは生じたエネルギー泡の運動エネルギーに使われる。加速器の一覧表をつくるときには，エネルギー泡自身のもつエネルギー順に並べるのがよいだろう。例えば，セルンの陽子シンクロトロン(セルン最初の大型加速器)は陽子を 28 GeV まで加速したが，ビーム中の陽子が標的の中の陽子と衝突した後には，たった 7.5 GeV のエネルギー泡しか得られなかった。残りのエネルギーは泡が前方に走るのに使われる。2 つの粒子が同じエネルギーで正面衝突する衝突型加速器(コライダー)の場合には，生じたエネルギー泡が静止しているので，すべてのエネルギーがその泡の中にある。ちなみに物理学者が泡のエネルギーについて話すときは，重心系のエネルギーといういい方をする。

最初の固定標的大型加速器は，少々大げさだが，コスモトロンと名づけられ，1952 年にブルックヘブンで運転を開始した。陽子ビームのエネルギーは，質量エネルギーをのぞいても 3 GeV を超えるほどだった。1957 年頃にはロシアでも，モスクワ近郊のドゥブナに 7 GeV (泡のエネルギーは 3.8 GeV)の加速器がつくられた。1959 年にはセルンで陽子シンクロトロン(PS)が，最初のエネルギー28 GeV (泡のエネルギーは 7.5 GeV)で稼働を始めた。ほんの少し遅れて，アメリカではロングアイランドにあるブルックヘブンの強収束シンクロトロン(AGS)が完成し，30 GeV (7.7 GeV の泡エネルギー)の陽子をつくり始めた。どちらの装置も，陽子を，一定の大きさの円形パイプの中で加速して，速くなるにつれて磁場を連続的に強め，強収束法という方法でパイプの中に閉じ込める方式をとっていた。強収束法は，安定した細いビームをつくるためにブルックヘブンの物理学者達によって再発見[d]されたもので，この種の装置をつくるのに決定的に重要だった。

さらなる発展は，装置の大型化という形で訪れた。セルンやブルックヘブンの装置は直径が約 200 m だったが，次世代の装置は直径が約 2 km もあった。1 つはセルン(SPS)につくられ，エネルギーは 400 GeV (泡エネルギーは 27.5 GeV)に達した。また，フェルミ国立研究所(FNAL，シカゴ近郊)に建設

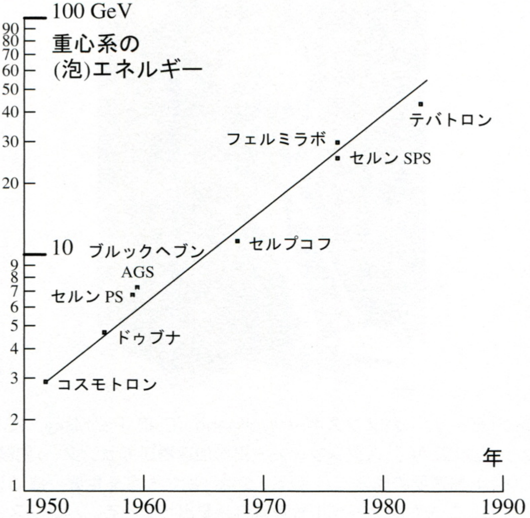
---

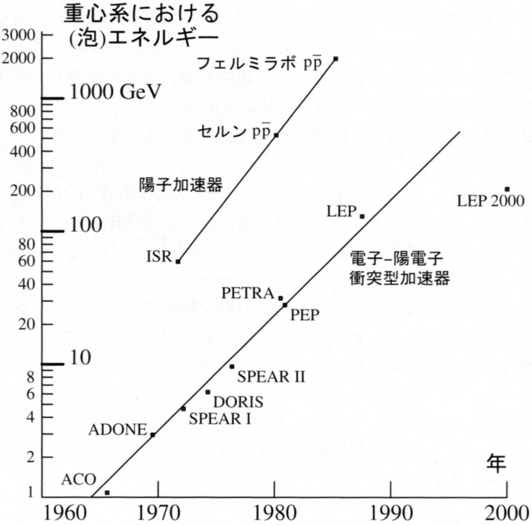
[d] ギリシャの技術者ニコラス・クリストフィロス(Nicholas Christofilos)によって最初に発明された。彼は特許を取っていたが，論文はプレプリント(学術雑誌に出版される前に配る論文)としてしか出版しなかったので，広く知られてはいなかった。

された装置は，エネルギーが少し高い500 GeV（泡エネルギーは30.7 GeV）の陽子をつくりだした。さらに後には，超伝導磁石を用いることによってエネルギーを1000 GeV＝1 TeVに倍増させた。この装置はテバトロン（Tevatron）とよばれ，加速器のリングに沿って約900個の超伝導磁石が並んでいる。鉄芯の入った電磁石なら約2 Teslaの磁場までしかつくることができないが，超電導磁石なら10 Teslaまでつくりだせる。超電導磁石は鉄の芯をもたないが，磁石を通る電流は桁違いに大きく5000アンペアに達する。電流がこれほど大きいと，コイルの電線の抵抗の影響が大きくなるので，電線の材料には超伝導物質（ニオブ合金の一種）を使う。超伝導コイルは零下270度（液体ヘリウムの温度）に保つと，電流を流したときの抵抗が完全に0になる。だが超電導磁石は危険な装置だ。何かの事故や失敗によって，ほんの一部だけでもコイルの温度が上がって超伝導でなくなると，流れている大電流によって，その部分に莫大な熱が発生する。さらに周辺部分が熱せられると大災害が生じる。爆発現象と言っても過言ではないので，特別の対策を講じる必要がある。特に，温度が上がるとヘリウムは瞬時に気体に変わるので，すぐに回収しなければならない。この種の加速器では，本当に恐ろしいほどの技術が用いられている。

加速器で得られる泡エネルギー（重心系におけるエネルギー）と加速器が建設された年をグラフに書いてみるとおもしろい。驚いたことに，y軸を対数目盛にすると，グラフが直線になる。普通のグラフでは縦軸の目盛りを等間隔にとり，1目盛り増えるごとに決まった量だけ増えるので，1，2，3，4と目盛りを付ける。しかし対数目盛の場合には，縦軸の目盛りが1つ増えるごとに，決まった数が掛け算されるので，目盛りは1，10，100，1000，10000と増える。昔懐かしい計算尺にはこの種の目盛りがふってある。対数目盛は世界人口の増加など，いろいろなところに現れる。先ほどの加速器のグラフはアメリカの加速器建設者にちなんで，リビングストン・プロットとよばれている。右の上の図には，建設されたすべての加速器が描いてあるわけではなく，そのときそのときの最高エネルギーの加速器が主となっている。

同様な図は，貯蔵リングを用いるコライダー（衝突型加速器）にも当てはまる。コライダーには，陽子-陽子，陽子-反陽子，電子-陽電子，電子-陽子，陽電子-陽子の5種類がある。このうち陽子-陽子，電子-陽子，陽電子-陽子のコライダーには，交差したリングが2本必要だが，粒子-反粒子のコライダーの


100 GeV
重心系の
(泡)エネルギー
10
テバトロン
フェルミラボ
セルン SPS
ブルックヘブン
セルプコフ
AGS
セルン PS
ドゥブナ
コスモトロン
年
1950
1960
1970
1980
1990


重心系における
(泡)エネルギー
1000 GeV
100
10
フェルミラボ pp̄
セルン pp̄
陽子加速器
ISR
LEP
LEP 2000
電子–陽電子
衝突型加速器
PETRA
PEP
SPEAR II
DORIS
SPEAR I
ADONE
ACO
年
1960
1970
1980
1990
2000



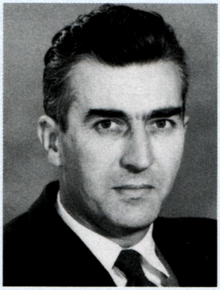
ウォルフガング(ピーフ)・パノフスキー(Wolfgang (Pief) Panofsky, 1919)　ピーフの功績は，スラック(SLAC，スタンフォード線形加速器研究センター)創設と，電子(および陽電子)の線形加速器の開発だ。スラックは，紛れもなく世界一成功した素粒子物理学研究所であり，3人ものノーベル賞受賞者を輩出している。パノフスキーは1961年から1984年までスラック所長を務めた。スラックが建設中だった1963年に滞在した私は，ピーフのリーダーシップと知識量，知性に深い感銘を受けた。

プリンストン大学およびカルフォルニア工科大学(博士号取得)で教育を受けた後，ピーフはマンハッタン計画(原子爆弾)に参加した。バークレーを経て1951年にスタンフォード大学教授になったパノフスキーは，軍縮問題に積極的に携わっており，本書発行時にもなお，米国政府のアドバイザーを務めている。

彼の業績はすばらしいもので，数々の賞を受賞している。ノーベル賞ではない点が皮肉ではあるが。

彼の父，エルヴィン・パノフスキー(Erwin Panofsky, 1892-1968)は大変著名なドイツ美術史家だ。1934年，ユダヤ人だった彼はドイツを脱出した。そして，ほどなくしてプリンストンの高等研究所に勤めだした。エルヴィン・パノフスキーには，もう1人息子がおり，ハンス・パノフスキー(Hans Panofsky, 1917-1988)といった。彼も大変に優秀で，晴天乱気流や大気汚染物質の分散の研究を行っていた。2人の息子達がプリンストン大学の学生だった頃，彼らの優秀さはいち早く周囲の知るところとなった。片方のほうが若干賢そうに見えたため，賢いパノフスキーと馬鹿なパノフスキーと呼ばれていた。

ミュンヘンを訪ねたピーフは，美術館に行きたくないかという問いに，こう答えた。「父がいつも長時間にわたって絵画の説明をしてくれたおかげで，ある時から，もう絵画は1枚も見ないことに決めたよ」。

ロバート・ウィルソン(Robert Wilson, 1914-2000)と**ジョン・アダムス**(John Adams, 1920-1984)。コーネル大学で働いていたロバート・ウィルソンは，1967年，シカゴ近郊におけるフェルミラボ(フェルミ国立加速器研究所)建設に着手した。フェルミラボのメインビル(高層ビル)をはじめとする建物のデザインから，構内に散りばめられた彫刻の制作まで，彼の仕事は多岐にわたっている。おかげで，フェルミラボの加速器建設費用は予算を下回った。彼が所長を辞めたのは1978年のことだ。

ワイオミングに生まれたウィルソンは，驚嘆に価する人物である。平和的な考えをもち続けた彼だが，原爆計画にも携わった。パノフスキー同様，戦後は反戦運動に関わっている。ベン・リー(Ben Lee，フェルミラボの理論部のヘッドだった)によれば，1971年のアムステルダム会議(ト・ホーフトがゲージ理論のくりこみ可能性を報告した)の後，ウィルソンからゲージ理論の研究をするように急かされたらしい。

研究所所長という地位にあれば，すべての人にいい顔をするわけにはいかない。忙しく働いていない人は誰でもクビにするという，フェルミラボ建設期のウィルソンの態度は有名だ。あるとき犠牲者のひとりが，「あなたには私を解雇できないはずだ」と言った。ウィルソンは「なぜできない」と聞いた。その男は，「私はフェルミラボのために働いているわけではありませんから」と答えたのだった。

セルンの2つの加速器，PS (1953-1959)とSPS (1971-1975)を建設したのが，アダムスである。彼は，1971年から1980年にかけて，セルンの所長も務めている。公式資格はもたなかったが，アダムスは非凡な建築家でありエンジニアだった。彼は，アメリカのセルンに当たるフェルミラボのウィルソンに強い対抗意識をもっていた。フェルミラボが超伝導磁石を用いたテバトロン建設を決めたとき，彼はセルンでも同等か，さらに優れたものを建設したいと私に話した。だがセルンでは，代わりにLEPの建設を決定した。この決定はアダムスが所長のときに行われたものだが，彼自身の好みではなかった。とはいえ，最後には彼もLEP建設を支持した。LEPのエネルギーを決定したのは，後継者のショッパー(Schopper)である。

場合には粒子と反粒子を反対向きに回すので 1 本のリングで済む。

トウシェクの AdA 建設以後，多くの新しいコライダーが次々に建設された。最大のものはセルンの LEP で，1 ビーム当たり 91 GeV のエネルギー，つまり 182 GeV のエネルギー泡をつくりだせる設計である。LEP 運転の最後の月に，技術者達はすばらしい腕前を披露して，LEP の重心系におけるエネルギーを 209 GeV まで引き上げた。169 ページの下の部分に，コライダーのリビングストン・プロットを載せておいた。繰り返すが，すべての加速器を載せたわけではない。

ACO（頭文字で略してある装置については索引を見てほしい）は，フランスのオルセーにある装置である。多くの電子-陽電子衝突型加速器と同様に，貯蔵リングは 1 本だ。AdA を引き継いだ ADONE は，イタリアのフラスカティにある。PEP，SPEAR I とその改良版である SPEAR II は，カリフォルニア，スタンフォードにあるスラック（スタンフォード線形加速器研究センター）の装置である。

DORIS と PETRA はドイツのハンブルグにあるデジー（ドイツ電子シンクロトロン）研究所の装置である。ここには，本書出版時では世界唯一の電子-陽子コライダー，HERA もある。HERA の泡エネルギーは 400 GeV である。LEP と ISR はセルンにある。ISR はリングを 2 本もつ陽子-陽子コライダーである。セルンとフェルミラボ（シカゴ近郊）にある $p\bar{p}$ コライダーは，SPS とテバトロン（Tevatron）貯蔵リングを用いている。つまり，反陽子ビームと陽子ビームの両方が 1 本のリングを使っている。まだ図中にプロットされていないのは，セルンの LEP トンネル内にある LHC という陽子-陽子コライダーである。何も問題がなければ，2007 年までに，LHC は 14 TeV，つまり 14000 GeV のエネルギー泡をつくるだろう。おそらく LHC は最後に建設される陽子加速器になるはずだ。LHC はそれぞれ最大 7 TeV のビームを 2 本もち，4 か所で互いに交差する。測定器は交差点に置かれることになっている。考えてみてほしい。LHC の円周は，26.67 km にも達する。つまり 25 km もある超伝導磁石が必要なわけだ。超伝導磁石はどれも技術の粋を集めたものである。詳しい情報が知りたければ，セルンのウェブサイト（www.cern.ch）を見てほしい。ちなみに，セルンはワールドワイドウェブ（World Wide Web, WWW）発祥の地でもある。WWW を開発したのは，ロバート・カイリュー（Robert Cailliau）とティム・バー

ナーズ–リー(Tim Berners–Lee)の2人だ。セルンの実験グループに参加しているさまざまな大学の研究者間のやり取りを円滑に進めるために開発したシステムだった。

アメリカで計画されていた超伝導スーパーコライダー(SSC)は，陽子–陽子コライダーだったが，建設途中で中止されてしまった。40 TeVの重心系のエネルギーを達成するこの装置を完成するには，110億ドルもの予算が必要だった。今では，48 kmにわたる空っぽの地下トンネルが残っているだけである。現在計画中のものとしては，一対の非常に長い線形加速器でつくったビームを正面衝突させるリニアコライダーがある。そのデザインは息を飲むほどで，本当にすばらしいものだ[†]。さらにミューオン–反ミューオン衝突型加速器の話もあるが，なかなか難しそうな装置である。

[†]　(訳者注)アジア，アメリカ，ヨーロッパなどの国際協力で国際リニアコライダー(ILC)計画が進められている(http://www.linearcollider.org/)。日本語ページはhttp://www.linear-collider.org/。

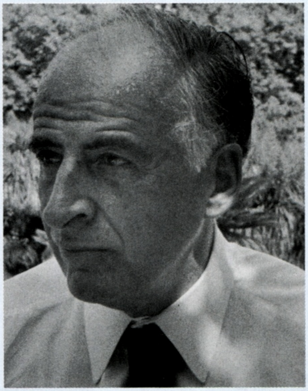
7 セルンのニュートリノ実験

7.1 序　　論

1959 年，スイスのジュネーブ近郊のセルンで陽子シンクロトロンが動き始め，続いてアメリカのロングアイランドにあるブルックヘブンで強収束シンクロトロン(AGS)が活動を開始した。これらの加速器では陽子をそれぞれ 28 GeV と 33 GeV に加速した。どちらも当時最大の加速器で，直径はおよそ 200 m である。ビームの強さも相当なもので，3 秒間に 10^{11} 個の陽子を加速した。この新しいおもちゃを手にした物理学者たちはわくわくしながら実験を始めた。高エネルギー物理学は巨大科学の時代に入ったのである。

当時，イギリスを除くヨーロッパの素粒子物理学は惨めな状況にあった。第 2 次世界大戦で荒廃したヨーロッパは，復興を始めたばかりだった。思うに，最大の問題は指導的な物理学者がいなくなってしまったことであろう。ユダヤ系物理学者はアメリカに逃れ去ってしまった。フェルミまでもがアメリカに渡ってしまった(正確には，ユダヤ人だったのは奥さんである)。このような状況もあって，1957 年以前のヨーロッパではたいした実験は行われていなかった。サイクロトロンはあちこちにつくられていたが，(原子核の構造を調べる)原子核物理学に使われていただけである。1957 年にサチューン(Saturne)という 3 GeV の陽子シンクロトロンがフランスでつくられたが，私の知るかぎり，素粒子物理学の発展にはたいして貢献せず，実験家を教育するのに役だっただけである。

アメリカにおけるフェルミの影響は計り知れない。私は，たったひとりの人間の存在が大きな差を生み出した典型的な例だと思っている。



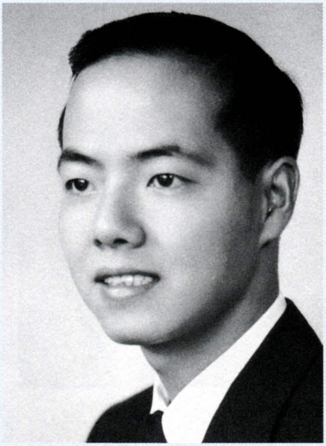


ブルーノ・ポンテコルボ(Bruno Pontecorvo, 1913-1993)と**メルビン・シュワルツ**(Melvin Schwartz, 1931)。ポンテコルボは，実質的にニュートリノ実験に関するすべてのアイデアを出した。塩素アルゴン法とよばれるニュートリノ検出法(太陽からのニュートリノも含む)や，ニュートリノ混合を(1957 年に)最初に思いついたのも彼である。塩素アルゴン法はデービス(Davis)によって実用化され，さらに発展している。デービスは，原子炉からの反ニュートリノがニュートリノとは別物であることを示し，太陽からのニュートリノを検出した人である(2002 年ノーベル賞)。

巨大加速器を用いたニュートリノ実験のアイデアは，シュワルツとポンテコルボの功績である。さらにシュワルツは，レーダーマン，シュタインバーガー，グリアーノ(Goulianos)，ガイヤール(Gaillard)，ミストリー(Mistry)，ダンビー(Danby)やヘイズ(Hayse)と一緒に，実験を行った。レーダーマンとシュワルツはこの画期的な実験により，1988 年のノーベル物理学賞を受賞した。

ポンテコルボは熱烈な共産主義者だった。1930 年代に政治運動を始め，1950 年には亡命に近い形でロシアに渡った。原子爆弾の秘密をロシアに持ち出したとして非難されている人物のひとりでもあるが，たいして重要な役割は果たしていないはずである。彼は一度も軍需研究に携わっていない。ただ共産主義を信じていただけだ。そして，その代償は払ったと思う。

シュワルツは，後にスラック(SLAC)におけるビームダンプ実験を提唱し，実際に少しの間稼働させている。1971 年のアムステルダム会議の折に，彼から(メロンと呼ばれていた)何枚かの写真を見せてもらったが，彼が中性カレントのニュートリノイベントを見つけたのはすぐにわかった。スラックの所長(パノフスキー)と衝突して居づらくなった後，シュワルツは物理を離れ，デジタル・パスウェイという電子産業の会社を興して成功を収めた。個人的には，彼はビジネスマンとしてよりも物理学者としてのほうが優れていたと思う。あまりにも正直者だから。




ツン・ダオ・リー(Tsung Dao Lee, 1926)と**チェン・ニン・ヤン**(Chen Ning Yang, 1922)。パリティ非保存の研究により1957年のノーベル賞を分かち合った2人。パリティ非保存問題というのは，鏡に映した世界の物理法則がどうなるかという問題である。ある実験と，それを鏡に映した実験を独立に行った場合，2組の実験から得られる物理法則は，果たして同じだろうか？　2人は2つの法則が異なると仮定して解析を行い，実際に実験結果は異なっていた。静止しているパイ中間子が，ミューオン(と反ニュートリノ)に崩壊するとき，ミューオンは進行方向に対して左巻きに自転しているが，鏡に映すと反対方向に自転している。

リーとヤンは1962年までは共同で研究していたが，以後は，それぞれの事情から別々に研究を進めた。一緒のときのほうが，成果があがっていたように思えてならない。相乗効果だろう。彼らが，始めたばかりのベクトルボソン(弱い相互作用の W と Z)の系統的研究を続けていたら，標準モデルの構築にどれほど貢献したかわからない。リーはファインマン・ダイヤグラムにめっぽう強かったし，ヤンはミルズ(Mills)とともに標準モデルの重要な道具であるゲージ理論(ヤン-ミルズ理論ともよばれる)の創始者として知られている。

シュワルツのニュートリノ実験のアイデアを知ったリーとヤンは，状況を精細に分析し始めた。1960年に出版された2人の論文は，コロンビアとセルンのニュートリノ研究者の道しるべとなるものだった。リーとヤンは，アイビーエム(IBM)からきたマークスタイン(Markstein)とともに，ニュートリノ実験でベクトルボソンを検出するための，初めての大規模計算を行った。ベクトルボソンがあまりに重かったので，実際には何も見つからなかったけれど。

ヨーロッパの状況は，国ごとに大きく違っていた。オランダでは，本当の意味での素粒子物理の実験をやっている人はまったくいなかった。実際のところ，意味のある実験を始める資金もなかった。ただし理論方面では，国際的に著名な物理学者も数人いた。特に，クラマースは素粒子論の基本となる貢献をした。1952 年にクラマースが亡くなってからは，彼の学生だったファン・カンペン（N. van Kampen）だけが素粒子物理学の中で輝きを放っていたが，残念ながら 1958 年頃に統計物理学に転向してしまった。

ほかのヨーロッパの国々でも，悲惨な状況は変わらなかった。フランスではド・ブロイ（L. de Broglie）が理論物理学の発展を妨げていた。ドイツには老いたハイゼンベルクがいたが，名声は傷つき，すでに理論物理学の主流からは外れてしまっていた。優秀な理論家もいたが，実験とかけ離れた非常に抽象的な研究を中心に行っていた。スイスには多くの優秀な理論家，特に，パウリとシュテュッケルベルクがいた。

ヨーロッパにおける悲惨な状況を切りひらく突破口となったのは，新たな国際研究機関の創設だった。セルンの協定文書は 1953 年に調印され，7 年後には最初の大型加速器がジュネーブで動き始めた。セルンがヨーロッパの物理学にとって欠かせない存在となったのは，大型加速器を備えているからだけでなく，一国では決して実現できないような物理学研究のセンターとしての役割を果たしているからである。当時セルンに行けば，主にアメリカ人だったが，この分野を先導する著名な物理学者全員に会えるほどだった。

本書の目的は第 2 次世界大戦後のヨーロッパの状況を描写することではないが，当時の事情について，これまでに誰も書いていないのではないだろうか。普通なら隠しておく事柄だとは思う。私自分も 1961 年になってからこの分野に入ったので，当時の状況について語る適任者とはいえない。私がセルンに着いた 1961 年頃，素粒子論の世界におけるセルングループは，とてもアメリカに太刀打ちできる状況ではなかった。K 中間子やパイ中間子は 1950 年頃にはよく知られていたのに，私自身はその区別すらできなかった。私が弱い相互作用とニュートリノ物理の研究を始められたのは，セルンで，ファインマンの学生だったアメリカ人の物理学者バーマン（S. Berman）と出会ったおかげだ。セルンでは，その後長く共同研究を行うことになるベル（John S. Bell）との友情にも恵まれた。セルンでも，ベルのように弱い相互作用とニュートリノ物理学

に強い興味を抱いて研究を続ける人はまれだった。

私はニュートリノによるベクトルボソン生成の計算から手を着けることにした。ベクトルボソンの質量が1.5 GeVより軽ければ，当時の実験装置でも観測できるはずだった。本書の読者は，ベクトルボソンがはるかに重い80 GeVもの質量をもつことをご存知だろうが，当時の私たちが知る由もない。この計算は結構面倒なものだが，T. D. リー，マークスタイン(P. Markstein)とC. N. ヤンがすでに行っており，セルンのニュートリノ実験を始めようとしていた実験家たちにとっては，大変重要なものだった。とにかく，そんなわけで1962年の年末頃に，私は実験家たちと接触するようになった。1963年の6月に始まった実験は，私の物理学に大変な影響を及ぼした。前人未踏の新世界に踏み入る興奮は，ほかの何ものにも例えがたい。実験結果が出てくるのを見つめる心境は忘れられない。失敗に終った実験だったが，あの体験に対する私の気持ちは一生薄れないだろう。

あの実験がなぜ失敗したかと問われたら，ヨーロッパはまだ回復途上だったからだと答えるしかないだろう。まだ，皆が学んでいる最中だった。とりたてて経験のある人は誰もいなかった。何を追求すべきかを教えてくれたのは，ヨーロッパ人ではなかった。特にリーとヤンの貢献は偉大である。技術的にいえば，実験は大成功だった。かなりの数のオランダ人を含め，セルンの技術者は誰にも劣らなかった。弱点は物理学の側にあった。もちろん，理論物理学も含まれる。理論に関する責任は，主にベルと私が負うべきだろう。イギリスから来ていた実験家のパーキンス(D. Perkins)は，せっかく見せたニュートリノ実験データのグラフから，スケーリング則(何を意味するかは気にしないでほしい)を発見できなかったのはなぜなのかと，今に至るまで私たちを責め続けている。ついでながら，スケーリング則はスタンフォードの理論家J. ブジョルケンによって，1960年代末に発見された。この法則を導くのに使われた実験データを出したスラックの実験家達(ブジョルケンではなく)は，その功績で1990年のノーベル賞を貰った。ドン，この件については謝るよ。

セルンのニュートリノ実験が見逃したのはスケーリング則だけではない。もう少し整理して説明するつもりだが，その前に，実験装置と当時の目的を説明しておこう。

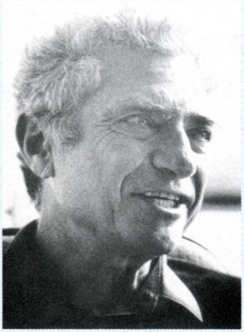
7.2 実験装置

イタリアの物理学者ポンテコルボ(モスクワ近郊のドゥブナにある原子核共同研究所)とアメリカの物理学者シュワルツ(コロンビア大学)は，巨大加速器でつくった高エネルギーのニュートリノビームを使う実験の必要性を提唱した。これから説明するニュートリノ実験は主にシュワルツのアイデアに基づいている。当時，リーから，弱い相互作用の高エネルギー実験を行うことができるかどうか質問されたシュワルツは，そのときの議論に啓発されてニュートリノ実験の可能性について考え始めた。彼が1959年に，自分とポンテコルボのアイデアをもとに提案した実験の基本的な構想は次のようなものだ。

まず，最大エネルギーで運転している加速器から取り出した陽子を，静止した標的に衝突させる。標的の中の原子核に陽子がぶつかると，電荷を帯びたパイ中間子が非常にたくさんできる。このパイ中間子は主にミューオンとニュートリノに崩壊するが，壊れるまでにはしばらく時間がかかる。標的の後ろには，パイ中間子が崩壊するための場所が25 m程用意されている。その後ろには，遮蔽するための物質が多量に置かれていて，ニュートリノ以外の粒子は何も通さないようにしてある。ニュートリノを遮断するには地球程度の厚さでは足りない。多量の遮蔽材の後ろには測定器が置いてある。

このアイデアの最大の難点は，つくりだしたニュートリノの量である。果たして測定器の中で反応を起こすのに十分なくらい出てくるだろうか？　当時のアイデアは荒っぽいものだった。しかし，ほんのわずかだが反応は起きた。そして，十分実験できるくらいのニュートリノが生まれてきた。

実験の成否は，測定器の大きさにかかっていると言っても過言ではない。測定器中の物質の量を増やせば，比例する形で，ニュートリノによってつくられた粒子が見つかる確率も大きくなることは明白である。幸いにも，ちょうど日本の物理学者の福井崇時と宮本重徳がスパークチェンバー(放電箱)という新しい装置を発明したところだった。スパークチェンバーのすばらしい点は，重くて厚い物質の板をつくること，つまり何十トンもある測定器をつくることができることである。実は測定器自身が標的も兼ねているのだ。スパークチェンバーがニュートリノ実験に適すると提案したのは，アメリカの物理学者，アーウィン・プレス(Irwin Pless)だった。

レオン・レーダーマン(Leon Lederman, 1922)と**ジャック・シュタインバーガー**(Jack Steinberger, 1921)の2人は，ブルックヘブンのニュートリノ実験によるミューオンニュートリノ発見に対し，シュワルツとともに1988年のノーベル賞を贈られた。

シュワルツのアイデアが出た後，実験を行うためのグループ(ブルックヘブンとセルン)が2つできた。数か月早く実験を開始できそうな点で，優位に立っていたのはセルンだった。ブルックヘブンのほかのメンバーが驚いたことに，シュタインバーガーはサバティカル休暇をとってセルングループに加わった。だがスウェーデンの物理学者ヴォン・ダルデル(von Dardel)が，イベントの起きる確率の計算に誤りがあるのを見つけたので，セルンの実験は突然中止された。セルングループはビーム取り出し装置を付け，ファン・デル・メーアの収束ホーン(豊饒の角)を付け加えて再出発したが，もはや優位といえる状況ではなかった。シュワルツの表現を借りると，「セルンのジャック達は，1961年初頭には最初のニュートリノイベントを観測するだろうと思われていた。だが，しばらくすると，セルンがニュートリノ実験を中止したという信じられないニュースが飛びこんできた」。

シュタインバーガーはコロンビアに戻り，おそらく紆余曲折の末に，ブルックヘブングループに再加入した。そして数年後に再びセルンに戻った。彼はいくつかのすばらしい実験を行った。分離場磁石(Split Field Magnet)の創始者(*auctor intellectualis*)でもある。複雑な磁場をもつこの測定器を使うと，何でもわかるはずだった。しかし，あまりに複雑だったので，計算機のプログラマーにとっては悪夢，いや墓場となった。splをshと置き換えてよぶ皮肉屋も現れた(split Field Magnet → shit Field Magnet)。

1950年に，シュタインバーガーは(パノフスキーとステラーとともに)中性のパイ中間子を発見した。さらに崩壊確率の計算も行ったが，この計算は後に重要となる。

1978年にレーダーマンはウィルソンの跡を継いで，フェルミラボの所長になった。その前の1977年に，彼はフェルミラボの実験で，実質的にボトムクォークを発見していた。



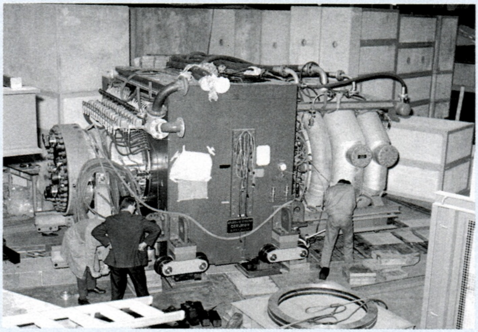
ヘルムート・ファイスナー(Helmut Faissner, 1928)と**フランク・クリーネン**(Frank Krienen, 1917)が，セルンのニュートリノ実験のときにヤンと話している場面。ファイスナーとクリーネン(それに発案者のひとりとしてセルンの実験に参加していた福井も)は，主にスパークチェンバー装置の責任者だった。その性能はすばらしいもので，稼働からわずか数日でビーエヌエルの結果(8 か月かけて 56 イベント)を再現することができた。そして,本格的に *W* の探索が始まった。なかでもファイスナーはよく働いた。念力でイベントが起きるなら，彼の所で起こっただろう。だが，悲しいことに，そんな幸運はやってこなかった。

後にファイスナーと彼のアーヘングループは，次のタイプの中性カレントイベント，ニュートリノ＋電子 → ニュートリノ＋電子，を発見した。1972 年に，ガルガメルというフランスの巨大な泡箱で，たくさんのニュートリノを照射したときの写真から見つかったのだ。このイベントは，現在標準モデルとよばれる理論を強く支持する証拠のひとつとなり，多くの物理学者に，弱い相互作用がゲージ理論であると信じさせるきっかけとなった。

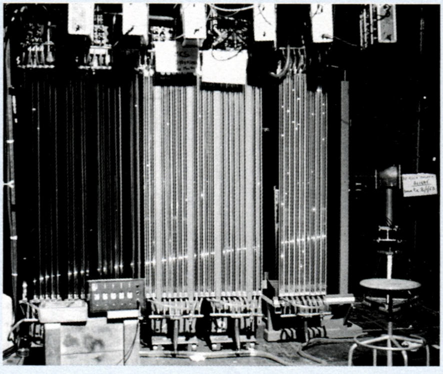
クリーネンは大変に優秀なオランダ人技術者で，創設時からセルンで働いている。セルンにはオランダの実験物理学者はまったくいなかったが，クリーネン，カイパー(Kuiper)，ファン・デル・メーア，ミドルコープ(Middelkoop)，デ・ラート(de Raad)，ジルバースホーン(Zilverschoon)等のオランダ人技術者は大きな影響力をもっていた。先ほど述べたように，クリーネンは後にデジタル式のスパークチェンバーを開発した。この装置は多くの実験に貢献したが，なかでもミューオン蓄積リングを使うセルンの *g*-2 大実験(第 9 章で述べる)は特筆すべきだろう。1982 年にセルンを定年退職したクリーネンはアメリカに渡り，2 人の子供を含め一家揃ってまったく新しい人生を歩き始めた。



セルンのニュートリノ実験のための遮蔽材を置いているところ

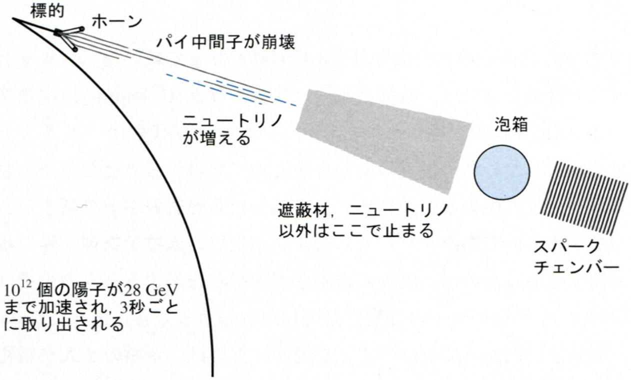


重い液体の入った泡箱を設置しているところ



スパークチェンバーと宇宙線でつくられたミューオンの軌跡

最初のニュートリノ実験は，シュワルツのいるコロンビア大学のチームによって，ブルックヘブン研究所で行われた。これについては後で述べるとして，まずセルンのニュートリノ実験装置を説明しよう。下の図は，1963年6月におけるセルンの実験装置の概略である。



ニュートリノの数を増やすための工夫は2点あった。1つは，陽子ビームを陽子シンクロトロンの外に取り出すようにしたことで，当時としては画期的な試みである。それまでは加速器の中に標的を置いていた。2つめは，ファン・デル・メーアの考案した電磁ホーンである。標的のすぐ後ろに置かれたこの装置で適切な磁場をかけることによって，電気を帯びたパイ中間子を一方向に向けられるようになり，ニュートリノの方向が揃うようになった。これらの工夫のおかげで，泡箱でニュートリノを検出できるくらいに，ニュートリノの量(フラックス)を増やすことができた。0.75トンの泡箱でおおよそ2000サイクルに1つのイベントが検出された。泡箱では1サイクルごとに減圧や写真撮影に3秒ほどかかる。2000枚の写真ごとに1イベントということは，陽子シンクロトロンを最高の状態で運転したとして，1日に15イベントの割合で反応が起きることになる。

スパークチェンバーはかなり精巧な装置である。前のほうには，細かな点を確認するために，比較的軽いスパークチェンバーが置かれたが，これはうまくいった。この部分を生成領域とよんだ。生成領域の後方の5つの放電箱のあた

りに電磁石を2つ置いた。これは生成領域から出てくる荷電粒子の電荷の正負と運動量を測るためのものである。最後に，レインジチェンバーという非常に重いスパークチェンバーを1組置いたが，これは出てくる荷電粒子がミューオンか否かを判定するためである。ミューオンなら長い物質でも通り抜けることができるので，レインジチェンバーの中で長い軌跡を描くのはミューオンだとわかる。

1963年の6月に開始された実験は，8月の終わりまで続いた。ブルックヘブン研究所における会議では，技術グループ代表のラム(C. Ramm)，泡箱グループ代表のボス(R. Voss)とスパークチェンバーグループ代表のファイスナーが実験結果を報告した。私の役目は結論をまとめて報告することだった。おわかりかと思うが，世界中の素粒子物理学会の花形たちが居並ぶ前で話すというのは，なかなかのものである。しかも，セルンが世界の素粒子物理学界に新規参入した瞬間でもあったのだ。実験の結論を理論屋が報告するときの光景は，シカゴ大学のV. L. テレグディの言葉を引用したらわかってもらえるだろう。「理論家が，実験家に向かって実験のことを説明するのは，新婚の2人が婚礼の夜に産婦人科医に伴われているようなものだ」。

7.3 ニュートリノ物理学

ニュートリノ物理学の理論を先導していたのは，リーとヤンだった。2人は1957年に弱い相互作用，特にパリティ非保存に関する業績でノーベル賞を受賞した(パリティ非保存がどんな意味をもつのかには立ち入らない)。コロンビア大学では，リーの影響を受けたシュワルツがニュートリノ実験の基本となる方法を考案した。リーとヤンが発表した論文はニュートリノ物理学の物理的側面を調べたもので，実験グループに方向を与える手がかりになっていた。その頃，重要な問題となっていたのは次の2点である。

1. 2ニュートリノ仮説
2. ベクトルボソン仮説

ニュートリノ仮説というのは次のようなものだ。ベータ崩壊(中性子崩壊がその主な例だ)を調べると，最後に出てくる粒子のエネルギーの総和が，最初のエネルギーに等しくないことがわかった。そこでパウリは，何か見えない粒

子が存在して，エネルギーを持ち去っているのではないかと提案して賛同を得た。現在のところ，中性子は次のように崩壊すると考えられている。

中性子 ⟶ 陽子 ＋ 電子 ＋ 反ニュートリノ

ここで，陽子と電子のエネルギーを足しても最初のエネルギー，つまり中性子の静止質量エネルギーに等しくならない。足りないエネルギーは反ニュートリノが運び去るからだ。

この仮説は一般に受け入れられたが，長い間，ニュートリノは不気味な粒子として扱われていた。エネルギーと運動量の不足を補うことだけが存在理由だったからである。状況が一変したのは，1956年にライネス(F. Reines，パールとともに，タウ中間子発見で1995年ノーベル賞受賞)とコーワン(C. Cowan)がシンチレーション測定器の中で，ニュートリノによって起きた現象を見つけたときだった。このとき用いられたニュートリノは，サバンナリバーの原子力発電所でつくられたものだった。原子炉では，核分裂で出てくる原子核のベータ崩壊により，かなりたくさんの(反)ニュートリノが出てくるのである。この実験でニュートリノが存在することは確かめられたが，定量的にはまだまだわからないことが多かった。

戦後になると，ニュートリノがエネルギーを持ち去るほかの反応も見つかっていた。例えば

パイ中間子 ⟶ ミューオン ＋ ニュートリノ
ミューオン ⟶ 電子 ＋ ニュートリノ ＋ 反ニュートリノ

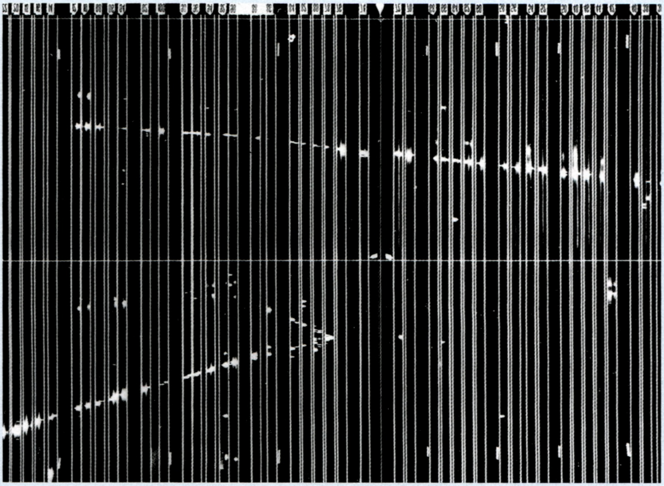
理論的には，これらのニュートリノがすべて同じものか，つまり，ニュートリノは1種類だけなのかどうかという点が争点だった。電子と一緒に出てくるニュートリノ(または反ニュートリノ)はミューオンとともに出てくるニュートリノと異なるかもしれないと考える人が多かったのである。中性子の崩壊によって電子と一緒に出現するニュートリノ(反ニュートリノかもしれないがここでは区別しない)は電子ニュートリノであり，パイ中間子の崩壊のときにミューオンと一緒に出てくるニュートリノはミューオンニュートリノという可能性もある。もしそうなら，ミューオンの崩壊のときに出てくる2つのニュートリノのうち，一方は電子ニュートリノであり，もう一方はミューオンニュー

トリノということになる。ニュートリノに2種類あるというこの考えは，2ニュートリノ仮説とよばれる。この考えを理論化する場合，電子数とミューオン数という2種類の量子数があると考える。電子と電子ニュートリノには，電子数1とミューオン数0を与え，ミューオンとミューオンニュートリノにはミューオン数1と電子数0を与える。もちろん反粒子の電子数とミューオン数は逆符号である。ほかの粒子の電子数やミューオン数はすべて0としておく。パイ中間子が崩壊する場合，始めのパイ中間子はミューオン数が0なので，崩壊した後のミューオン数も0でなければならない(正電荷のミューオンはミューオン数−1をもち，ミューオンニュートリノは+1をもつ)。ミューオン崩壊では，始めにある負電荷のミューオンはミューオン数+1をもつ。崩壊した後の状態には，ミューオンニュートリノ(ミューオン数+1)，電子(電子数+1)と反電子ニュートリノ(電子数−1)がある。

つまりニュートリノ実験では，大多数のニュートリノはパイ中間子の崩壊によってつくられる。パイ中間子はほとんどミューオンとそのニュートリノに崩壊するので，この実験で使うニュートリノはほとんど全部ミューオンニュートリノということになる。*K*中間子がニュートリノと電子等に崩壊するときに出る電子ニュートリノもいくらか混じるが，ほんのわずかである。

問題は，測定器におけるニュートリノの振る舞い方である。2ニュートリノ仮説が正しいなら，始めにミューオンニュートリノがある場合には，終状態にもミューオンかミューオンニュートリノがなければならない。つまりミューオン数がなくなって，電子だけが出ることは許されない(ミューオンと一緒に電子が出ることは可能だ。以下を見よ)。だから，実験の第1の達成目標は，2ニュートリノ仮説が正しいかどうかを確かめることだった。やり方は簡単である。ニュートリノが衝突した反応を注意深く調べて，終状態にあるのがミューオンか電子かを確かめる。ミューオンは物質中でも妨げられずに走るので長い軌跡をつくるが，電子はシャワーをつくるので容易に見分けることができる。したがって，そのイベントがニュートリノがぶつかって起きた反応であることさえ確かめれば，第1の目標は簡単に達成できる。

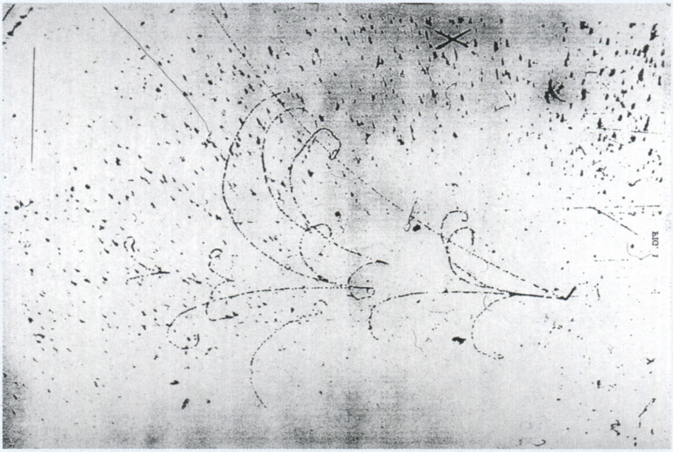
ベクトルボソン仮説は，これとは別の話である。今のところ，特に深入りする必要はない。ニュートリノ実験では，ミューオンと一緒にベクトルボソンがつくられる可能性があることだけを知っていればよい。ベクトルボソンはパイ

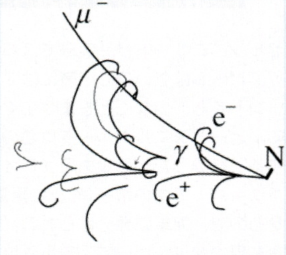


セルンのニュートリノ実験でスパークチェンバーを用いて撮った特別な写真。ニュートリノビームは強いので，時には 2 つのイベントが同時に起きることがある。どちらのイベントでも，少なくともまっすぐに出ていく軌跡(典型的なミューオン)が 1 本見えている。ビーエヌエルグループはこのタイプのイベントから，2 種類のニュートリノが存在すると結論した。いつもミューオンばかりで，電子がまったく出ないからだ。スパークチェンバーの中の電子(それに陽電子も)は，短い軌跡をたくさんもつシャワーを発生させるので，簡単に見分けられる。セルンの実験では図のようなイベントが短期間にたくさん見つかり，ビーエヌエルグループの結果を裏づけるとともに 2 ニュートリノの存在を確認した。

中性カレントイベントは，ミューオンや電子が出ないのが特徴である。ミューオンが出ないなら，下のイベントは簡単に見分けられるはずである。問題は，遮蔽材のあたりから迷い込んできた中性子が，似たような現象を引き起こすことである。中性カレント発見の成否は，いかにしてこの紛らわしい現象を取り除くかにかかっていたといってよい。だが，当時は中性カレントに関心をもつ人が誰もいなかったので，やる人がいなかった。

ときどき，もしセルンの実験が中性カレントを実際に確立していたら，物理学の歴史はどのように変わっていただろうと考える。弱い相互作用の現象論の一部になっていただろうが，たぶんそれだけのことであろう。理論的な枠組みがなければ，中性カレントがある種の理論を指し示していることを見抜くのは難しい。実際，当時は理論的な枠組みが何もなかった。





W 生成の証拠だと思われていた非常に初期の泡箱写真。右側の図はイベントを手書きしたものだ。ニュートリノビームは右側から入ってくる。原子核と衝突すると，いくつかの粒子が出てくる。はじき飛ばされた原子核は N で示してある。負の電荷をもつミューオン(μ^-)は，ほとんど相互作用を行わず，エネルギーを失わないので，すぐに見分けられる。ほかの軌跡は，割合早くエネルギーを失って止まってしまう電子(e^-)と陽電子(e^+)だ。軌跡が曲がっているのは磁場がかかっているためだ。陽電子は電子と反対向きに曲がっている。ここに写っているのはシャワーである。電子や陽電子から放出された光子は中性なので見えていないが，再び(カモメの形の)電子-陽電子対に変わる。図中では，そのような光子の 1 つを γ で表している。単独で飛び出した電子(図中の矢印で示したもの)は，たぶん，原子の中からはじき飛ばされたのだろう。

初めの写真では，シャワーは 1 個の陽電子から出ているように見えた。つまり，ミューオンが 1 個に陽電子が 1 個あるように思われた。エネルギーと運動量がつり合わなかったので，これが *W* という解釈は後に否定された。このイベントを *W* イベントと考えるには，ミューオンと陽電子のなす角度が大きすぎた。しかし，誰もが最初の何日間は，同じようなイベントがたくさん見つかって，*W* を発見できると信じていた。しかし残念ながら，泡箱から同じような写真が撮れることはなかった。自然のしくんだ，ちょっと意地の悪いいたずらだったのだ。

中間子や K 中間子に崩壊するかもしれないし，ある確率で電子とニュートリノの対や，ミューオンとニュートリノの対に壊れる可能性もある。ベクトルボソン仮説は以下の要領で検証できる。ミューオンニュートリノが測定器の中で何かの原子核に衝突すると，ミューオンとベクトルボソンができる(ほかにも原子核の破片なども出てくるが気にすることはない)。そのベクトルボソンは，ある確率ですぐに電子とニュートリノの対，またはミューオンとニュートリノの対に壊れる。このとき，終状態に電子(とニュートリノ)とミューオン(とニュートリノ)が現れる確率は等しい。だがニュートリノは見えないので，ミューオンが2個もしくはミューオンと電子が1個ずつ観測されることになる。当時はそれほど重要ではなかったので，我々は電荷の符号を測ろうとは思わなかったし，どれが粒子でどれが反粒子かを決めようとはしなかった。2つのミューオン，すなわち2本の長い軌跡，もしくはミューオン1個と電子1個，すなわち1本の長い軌跡と1つのシャワーを見つけようとしただけだ。これが，ベクトルボソンがつくられた証拠である。

1960年の段階では，ベクトルボソンの質量がどのくらいなのか誰にもわからなかった。当時の主な論点は，ニュートリノビーム中のニュートリノがベクトルボソンをつくるのに十分なエネルギーをもつかどうかだった。セルンでは25 GeVの陽子を使ってニュートリノをつくるが，できたニュートリノのエネルギーはだいぶ低い。ベクトルボソンが1.5 GeVよりも軽かったら，実際につくることができたであろうが，現在ベクトルボソンの質量として知られる値の80 GeVとはほど遠い。

これら2点の主要な目標に向けて稼動を開始した2つの加速器，セルンのPSとブルックヘブンのAGSにおいて，最初のニュートリノ実験が行われようとしていた。ブルックヘブンの機械は，実際のところ，セルン実験の開始から6か月後に完成する見込みだった。つまり，セルンはこの物理学的目標を達成するのに6か月分優位だったのである。この実験ではベクトルボソンは発見できそうになかったため，誰が2ニュートリノ仮説を証明することができるかが問題だった。まさに賞を得るにふさわしい問題だったし，実際に1988年のノーベル賞はこの業績に対して与えられた。歴史というものは実に興味深い。しばらくその話をしていこう。

7.4　最初のニュートリノ実験

ニュートリノ実験を思いついたシュワルツは実行に移した。資金や共同研究者を集めただけではない。もっとも重要だったのは，ブルックヘブン研究所所長ゴールドハーバー(M. Goldhaber)の支持を取り付けたことである。当時のセルンの臨時所長アダムス(J. Adams)は技術者出身だったが，ゴールドハーバーは有名な物理学者であり，その実験の重要さと将来性に対する理解の点では一歩先んじていた。彼は8か月の運転時間を含め，必要な権限を卒先してコロンビアグループに与えた。レーダーマンの本に出てくる話を信じるなら，ゴールドハーバーはこのとき，自分の学者生命をかけていたようである。コロンビア大学の物理学者たちはブルックヘブン研究所を自分たちのものだと思っている。アメリカの研究所はおおむね実験物理学者を所長にするが，セルンでは実験家だけでなく，技術者や理論家が選ばれたこともある。

セルンでは，イタリアの物理学者ベルナルディーニを指導者としたニュートリノグループが結成された。ベルナルディーニ自身は素粒子物理学の経験豊かな第一級の物理学者だった。だがセルングループの構成員の大半は，この分野の新参者だった。ブルックヘブングループよりも6か月早く開始できる有利さがあったとはいえ，両者は熾烈な競争を繰り広げた。

セルングループはニュートリノビームの設計から始めた。急いでいたので，最初の設計には，ビームの取り出しやファン・デル・メーアの電磁ホーンなどは組み込まなかった。標的は，単に陽子加速器の中に入れた。ビームを取り出すためのキッカー磁石や電磁ホーンも使わなかった。スパークチェンバーも使わず，代わりに2つの泡箱とウィルソン霧箱の付いた大きなシンチレーション測定器を用いた。3人のグループが，つくられるニュートリノの量(フラックス)と，この粗末な装置を使ったときに起こるイベントの回数を計算した。

皆の記憶が食い違っており，今となっては真相をはっきりさせるのは難しい。もちろん，ここに書くことが真実だと主張するわけではない。私は1961年の9月にセルンに着任したので，一連の騒動について知ったのはずいぶん後のことだった。ともかく，そのころに書かれた手紙から判明した話の重要な部分を述べておこう。

1961年の5月にスウェーデンの物理学者ヴォン・ダルデルが，ニュートリ

ノフラックスの計算に誤りがあるのを見つけた。驚いたことに，彼はセルンのニュートリノグループの一員ではなかったのだが，最初につくられたパイ中間子の量を直接測って，見積もりが正しいことを示すように頼まれていた。シンクロトロンは,電磁石がおいてある円形の部分と,その間の直線の部分からなっている。標的は，直線の部分に置かれることになっていた。標的から出てくるパイ中間子は，円周部分の電磁石の中を通らなければならないが，電磁石はパイ中間子の運動に影響を与える。その影響の大きさは，標的を置く直線部の長さと関係している。その部分についての計算を見直していたヴォン・ダルデルは，誤りに気がついた。さらに，パイ中間子が壊れるときに出るニュートリノが，パイ中間子の方向ではなく，厳密には下の図のように少しずれた方向に出るという初歩的な事実さえも見過ごされていたのである。



ヴォン・ダルデルの計算が正しければ，ほかの一切の実験を取りやめて，すべての運転時間をニュートリノ実験にあてたとしても，6か月間に3ないし4個のニュートリノイベントしか見つけることができない。非常に感情的になった彼は，この計算ミスはセルンの名折れであると叫んだ。1961年の夏，セルンはこの実験の延期を決定した。

セルンの加速器の直線部の長さは1.5 mだが，ブルックヘブンでは3 mあったので，パイ中間子に対する磁石の影響はセルンよりもずっと小さい。ブルックヘブンにおけるコロンビアの実験は，1961年の12月に始まり，8か月の稼働期間で56個のイベントを見つけ，1962年にニュートリノが2種類あることを発表した。見つかったのはほとんどがミューオンであり，電子はほんのわずかだった。この実験グループのリーダー達，レーダーマン，シュワルツ，シュタインバーガーの3人は1988年にノーベル賞に輝いた。

セルンはつまずいてもやめずに，前に進むべきだったのだろうか？　正解は誰にもわからない。どう考えてもニュートリノのフラックスは低すぎたようだ。測定器も小さすぎたし，スパークチェンバーもなかった。確かなのは，セルンが延期を決めたと聞いたとき，シュワルツが大喜びしたことだけである。



ヘルムート・ファイスナー(Helmut Faissner, 1928), **ギイ・ヴォン・ダルデル**(Guy von Dardel, 1919), **ジャンピエトロ・プッピ**(Giampietro Puppi, 1917)。1962 年 6 月, セルンのテラスにて。ギイ・ヴォン・ダルデルは, 第 2 次世界大戦のときに多くのユダヤ人を助けたスウェーデンの外交官, ラウール・ワレンベリの親戚である。戦争末期のブダペストにロシア軍が侵攻してきたとき, 収容所管理本部に連行されたワレンベリは行方がわからなくなり, 2 年半後に亡くなった。ワレンベリ一家, とりわけヴォン・ダルデルは, ラウールの行方を長い間捜し続けた。しかしロシアが, ラウールの所在, そしてロシアにいたこと自体を認めたのは, 2000 年のことである。事実の詳細については Web に載っている。

プッピは, プッピの三角形を導入したことで有名になったイタリアの実験物理学者である。$\mu \to e+\nu+\nu$ と, 中性子 → 陽子＋$e+\nu$ の反応が同じ強さであることを示唆するプッピの 3 角形はあまりにも単純だったため, カビボが彼の名を冠する角度(第 3 章)を導入してから忘れられてしまった。だが, プッピの三角形にはレプトンとハドロンの対称性という重要な真理が隠れていた。この対称性はゲルマンが良く引用しており, 原康夫が 4 番目のクォークの存在を予言したときにも用いられた。4 番目のクォークは, 現在, チャームクォークとよばれている(第 8 章の最後)。

プッピは, 数年間セルンの研究部部長を務めた。グレゴリー(Gregory)とともに, セルンの所長候補(ワイスコップの後任)として名が挙がった人でもある。我々はどちらと親しくしたものか困ってしまったが, 結果的にはグレゴリーが勝った。

セルンのテラスは, 遠くにモンブラン山を臨み, 高エネルギー物理学者に人気のある場所である。研究仲間の大半に会うことができるし, その雰囲気の中から数多くの新たな構想が始まり, たくさんのアイデアが生まれた。今のところ, 葉巻を燻(くゆ)らしても大丈夫である。

7.5　ベクトルボソン

コロンビアの実験結果が発表されると，出し抜かれたセルンは苦しい立場に陥った。そしてベクトルボソンの発見に的を絞らざるをえなくなった。だが一方で，ビームを取り出す装置や電磁ホーンを取り付ける時間的な余裕ができたのも事実である。それらが完成すれば，ブルックヘブンの実験の数倍ものニュートリノフラックスが得られるはずだった。さらに，大型のスパークチェンバーもある。大きな期待を背負った実験は1963年の6月に始まった。士気は高かった。ニュートリノビームの先に泡箱を置くことも決まった。フラックスが十分大きいので，質量の小さな装置でもニュートリノイベントが観測できるように思われた。

当時の私は実験に密接にかかわることも可能だった。スパークチェンバーで撮られた写真はつぎつぎと現像されていった。見たい人がいれば，スパークチェンバーが置いてある場所に行って，イベントが起きたときの火花を見ることもできた。ここでは少し脱線して，スパークチェンバーのトリガー(引き金)について少しふれておこう。

当時，ニュートリノイベントの終状態には，ほとんどの場合ミューオンが出てくることが，すでにわかっていた。特にベクトルボソンができるときには，同時にミューオンが出る。だからバックグラウンド†，とりわけシールド材のあたりからふらふらと飛び出す迷子の粒子に，みんなが神経質になっていた。そこで，荷電粒子が生成領域から出てきているときだけ，スパークチェンバーにトリガー††をかけることにした。さらに，生成領域の入り口付近から入ってくる荷電粒子を除くために，アンチトリガーをかけることにした。ニュートリノイベントは非常にまれな現象で，それに比べると，ほかのほとんどの現象ははるかに起こりやすい。だからこそ測定器の前方だけでなく，横や上下方向から紛れ込んでくる粒子を防ぐために，いかに良質の遮蔽材を用いるかが決定的

---

† (訳者注)求めている現象とよく似た現象が別の原因によって起きるときに，紛らわしい偽の現象をバックグラウンドとよぶ。

†† (訳者注)よく似た現象が紛れ込んでくる可能性がある場合に，明らかに正しい現象であることを別の方法で確かめてデータを取ることを「トリガーをかける」といい，明らかに違う原因で起きることを別の方法で確かめて除いてしまうことを「アンチトリガーをかける」という。

に重要だった。振り返ってみれば遮蔽材は非常に良質だったが，やってみるまではわからなかった。泡箱にはトリガーがかけられないので，陽子シンクロトロンから陽子が出てくるたびに，いつも準備を整えておかなければならない。したがって，バックグラウンドがあまり多すぎると，測定装置は信号で溢れかえってしまっていただろう。幸いそんなことにはならなくて，泡箱で撮った461 000枚の写真のうち，240枚にきれいなイベントが写っていた。

やろうと思えば，スパークチェンバーのそばに座って，飛んでくるミューオンの信号を見ることだってできた。胸が弾んでいた。もしかしたらベクトルボソンができたイベントを目にする瞬間が迫っているかもしれないのだ。まさに新しい世界に踏み込むような心持ちで，私は研究に熱中した。おかげで今日まで物理学者を続けることになってしまった。未知の世界へ旅立つあの気持ちは，バイキング号が初めて火星に着陸したときに味わったものと同じである。あのときテレビを見ていた人にはきっとわかっていただけるだろう。

知ってのとおり，セルンのニュートリノ実験では結局ベクトルボソンを発見できなかった。数日実験しただけで，あったとしても見つけるのは容易でないことが明らかになった。この事実はグループの士気に著しく影響した。実験への興味はあっという間に失われ，続行しても何ひとつ発見できないように思われた。スパークチェンバーの写真ができると，拡大して大きなスクリーン（スキャン台）に映し出し，1枚1枚を入念に調べていく。初めのうちはスキャン台の周りを皆うろうろして見入っていたが，すぐに誰も興味を示さなくなった。生成領域からくる粒子のスパークチェンバー写真すべてに目を通したのは，ベルナルディーニと私だけだったと思う。やや年配の経験を積んだイタリアの実験家と，理論家を目指していた私は，このときから大の親友になった。あの頃のことを思い出すたびに，ベルナルディーニとの友情がよみがえってくる。ブルックヘブンの会議で，なぜ私がセルンの実験グループを代表することになったのか，これでおわかりいただけただろう。実験結果が否定的だったことに落胆したベルナルディーニは，出席したくなくなって，私を自分の代理にしたてたのだ。

当時いろいろなことがあったが，詳しく語るのはよそう。もしスパークチェンバーのグループがもう少し現実的だったら，参加したたくさんの人たちがもう少し粘り強かったら，あのデータからもっとおもしろい結果を引き出すこと

ができたと私は思う。しかし彼らは興味を失ってしまった。結局，イベントは測定されないまま，系統的な解析も行われないままだった。科学上の発見には，最後の石をひっくり返してみるまで決してあきらめないことが重要だと思う。さらに，もっとたくさんもっと遠くへという努力を続ける必要がある。10年後に，スラック(スタンフォード)とブルックヘブンで，ジェイ／プサイ(J/ψ)とよばれる粒子が発見されたときにも似たことが起きている。この粒子は3096 MeVの質量をもっており，その程度のエネルギーをもつ電子–陽電子衝突型加速器で発見される可能性があった。フラスカッティ(Frascati)につくられたアドーネ(ADONE)とよばれる衝突型加速器は3000 MeVのエネルギーをもつように設計されていた。フラスカッティの人たちがスラックの発見を聞き，装置のエネルギーを上げてその粒子を見つけるまでに，ほんの数日しかかからなかった。噂ではストライキか何かやっていたらしいが，ニュースが伝わると次の日には，清掃員からトップに至るまで，全員が集まってきたらしい。どうして，もっと前に詰めの一押しをしなかったのだろう。きっと今でも歯ぎしりをしている人がいるに違いない。

ブルックヘブンの会議では，ベクトルボソンが見つからなかったことを報告した。つまり，ベクトルボソンの質量の下限を報告したわけで，そのときの言葉を引用すると，「Wが崩壊する際の分岐比の不確定さを無視すれば，$M_W>$ 1.3 GeVと結論することができる」。言い換えると，セルンの実験でWの証拠が見つからなかったということは，もしWが存在するならその質量は1.3 GeVより大きいことになる。そうでなければ，当然，証拠が見つかったはずだから。セルンの実験の惨めな後始末はこれだけではなかった。ブルックヘブンの会議(1963年9月9日～11日)のすぐ後に，イタリアのシエナで別の会議(1963年9月30日～10月5日)が開かれ，やはり理論家が結論報告のために出席した。私は出席しなかったが，ニュートリノの理論を担当していたベルが(ノルウェーの理論家Løvsethと共同で)話をした。ベルはこの問題に対する私の寄与を考慮して，私に論文を一度も見せていないのに，私の名前を著者のひとりに加えた。よかれと思ってそうしてくれたのだが，反対に私は困ってしまった。今と比べると，当時のヨーロッパとアメリカの通信事情はよくなかった。ともかく，世界中の物理学者がその会議に参加しており，セルンの実験でベクトルボソンが見つかったのかどうかに関する，セルングループとしての明確な声明を出す

ように要求した。セルンの人々は毎晩のようにシエナの塔の上に集まっては，この問題に悩まされていたそうだ。彼らは重大な発見を見逃したのだろうか？渋々ではあるが，最終的に，彼らは W の存在を認めてしまった。ベルは実験家がいったことをそのまま報告しただけだと思うが,「私たちの」論文には「もし W の質量が，例えば 2 GeV 以上になるとすれば驚くべきことだ」という記述が登場する。つまり，W が存在してその質量は 2 GeV 以下だと言ったわけである。セルンのニュートリノ実験における最悪の時代だった。

7.6 失われた機会

機会を失った理由にはさまざまなものがあるが，一番大きな要因は，スパークチェンバーのデータを系統的に解析しなかったことだろう。1963 年の 6 月から 8 月までの期間に，生成領域において 2000 個ほどのニュートリノイベントが記録されているが，真剣に分析されることは一度もなかった。

泡箱グループはもっと真剣に解析を行ったが，同じ期間で 240 のイベントしか手にしていなかった。これだけのデータで多くのことを示すのは，不可能ではないとしても難しい。

それらのデータには，どんな物理現象が隠れていたのだろうか。ここで考えるべき重要な点は 2 つある。中性カレントとスケーリング則だが，まず中性カレントから始めよう。

前に述べたように，ニュートリノが 2 種類あれば新しい量子数，すなわちミューオン数が存在するはずである。ニュートリノビームの中にあるのはミューオンニュートリノだけだと仮定すると，このニュートリノが起こすイベントの終状態には，必ずミューオンかミューオンニュートリノがあるはずだ。後者の場合には，ニュートリノが入ってきてニュートリノが出ていき，ミューオンは出てこない。このタイプのイベントを中性カレントイベントとよぶ。ニュートリノを見ることはできないが，衝突によって壊れた原子核の破片や新たにつくられるパイ中間子などは測定することができる。難しいのは，ミューオンの長い軌跡や電子のシャワーなどのような，はっきりした信号がないことである。その上, 迷い込んできた中性子が原子核にぶつかって破壊する反応と，見かけがそっくりで紛らわしい。したがって中性カレントイベントを見分ける



ジョン・ベル(John S. Bell, 1928–1990, 右側)と私。ニュートリノ実験から10年後にセルンのベルの部屋で。私たちは実験グループの準メンバーとして理論を担当していた。経験もなければ知識も不十分だったので,結局は,あまりうまくいかなかったけれど。実験終了後の1963年に,私たちは2人ともスラックに赴任した。そこで私はスコーンスキップという代数計算のプログラムを書き,ベルは有名な不等式を発展させた。ほかのことについても議論したし,一緒に論文も書いたけれども出版はされていない。量子力学の基礎に関する研究を趣味にしていたベルは,夕方に家で研究を続けていた。隠れた変数があるという無意味な説をはっきりと否定するつもりだと言い,それをやってのけた。この問題が現実の世界では何の役にも立たないと考えていた私は,彼がこの問題にますます没頭していく様子を見て,次のように尋ねたことがある。「どうしてこんな研究をやるんだい？　僕が今やっているような計算に少しでも影響を与えるのかい？」「君は正しい。でも,君は解釈に興味をもったり,おもしろいと思ったりしないの？」とベルは答えた。彼もある程度までは正しかったことは間違いない。実験で確かめられるということで,彼の研究は非常に重要になったからだ。この種の物理学では,頻繁に,針の先で天使が何人踊ることができるか,という次元の議論が行われる。それはそれでおもしろいところもあるけれど。

1991年。ミシガン大学のアナーバーで,みんなが私の60歳の誕生日の出し物としてベルのスピーチを計画してくれた。ところが,彼は突然逝ってしまった。ほどなくしてセルンを訪ねた折に,彼の机の前に座った私は,偶然,コンピュータのキーボードに触れてしまった。明るくなったスクリーンに現れたのは彼の最後の電子メールだった。「オーケー,歌をうたうよ」。なんともいえない,悲しい瞬間だった。

には，しっかりしたバックグラウンド解析が必要になる。このイベントがどのように見えるかを知るためには，ミューオンが出るイベントをすべて集めて，各イベントからミューオンを取り去ればよい。ミューオンが出るイベントは2000例あった。

この種のイベントなら必ずミューオンが出るはずだという理論的な偏見もあった。まったく異なる状況だが,2個のニュートリノが関わって電子やミューオンが出ない現象は起こらないことが，非常に高い精度でわかっていた。「2個のニュートリノが関わる」というときには，ニュートリノ実験のように1個が入ってきてもう1個が出ていってもよいし，何かの崩壊過程のように2個のニュートリノが出ていってもよい。後でわかるように，理論的にはどちらも同じようなものである。ニュートリノ相互作用についての詳しい理論は存在しなかったので，突き詰めて深く考える人はいなかった。そんな現象があるかどうかは，焦眉の問題ではなかった。リーとヤンも真剣には主張しなかった。彼らの論文では，中性カレントイベントについても一応述べているが，それ以上踏み込んではいない。彼らの有名な論文の最後には，「中性のベクトルボソンの問題についてはこの論文では考えない」と，書いてある。中性ベクトルボソンという表現は中性カレントと同じ意味だと考えてよい。当時は，その問題についてはさして興味をもたれていなかったが，1971年以後とみに大きく事情が変わったことを繰り返しておこう。

中性カレントイベントが起こったとしても発見不可能だった，という点は実験的見地からも明白だった。バックグラウンドを警戒して，ミューオンが生成領域から出るところにミューオントリガーがかけてあったのである。つまり中性カレントイベントが起きても，スパークチェンバーは放電しない。グループの会合で，ミューオントリガーを使わないで実験することが提案されたこともあったが否決されていた。それでも，データの中に何か見るべきものもあったかもしれない。例えば，たまに1枚の写真に2つのイベントが写っている場合もあったのだから。ともかく，中性カレントイベントはまだ一度も観測されたことがなかった。

泡箱を用いるほうが若干有利だった。泡箱では，ミューオントリガーを使っていなかったからだ。今から考えると，泡箱で撮った写真の中には，中性カレントイベントが相当混じっていたはずだ。解析が行われたことは確かだが，誰

も興味をもっていなかったし，間違いもあって気づかれなかったのだろう。私も含め何人かの人たちは，泡箱のデータを用いれば，かろうじて中性カレントイベントを確立できただろうと考えている。

1971年以後，弱い相互作用のゲージ群の構造（後で議論する）を決めるために，中性カレントイベントの存在が非常に重要になった。ここで，ちょっと寄り道をしよう。

中性カレントイベントは，ミューオンが出ないニュートリノイベントのようなものである。迷い込んだ中性子によって起こされたバックグラウンドイベントとは，いくつかの点で異なっている。第1に，中性子が起こしたイベントでは，出てくる粒子がもっと球対称に分布しているので，異なった形に見える。第2に，中性子はすぐに吸収されてしまうので，中性子イベントは泡箱の入り口付近でよく起きる。だが泡箱があまり小さいと，この効果ははっきり見えない。1971年重い液体を用いたフランスの非常に大きな泡箱（ガルガメルとよばれる）が，ニュートリノビームに据え付けられた。それ以降，このような解析が実行可能になり，ニュートリノによる中性カレントイベントの存在が確立された。

スケーリングの問題はもっと込み入っている。ニュートリノのエネルギーを変えたときに，ニュートリノイベントが起きる確率がどのように変化するかという問題や，弾性散乱と非弾性散乱の問題に関わっているのである。

ニュートリノは基本的には原子核中の中性子とぶつかるだけなので，原子核の残りの部分がどうなるかには，あまり影響を受けない。私が興味をもっているのは，基本となるメカニズム，すなわちニュートリノと中性子の衝突である。次のようなイベントは準弾性イベントとよばれる。

$$\text{ニュートリノ} + \text{中性子} \longrightarrow \text{ミューオン} + \text{陽子}$$

一般的には，始めにあった粒子と終状態の粒子が同じときに弾性イベントとよぶ。ミューオンとニュートリノを同一家族のメンバーだと見なし，同じように中性子と陽子を同一家族のメンバーだと考えれば，上の現象は広い意味で弾性イベントと見なすことができる。余分の粒子が新たにつくられるとき，例えば次のような場合には，非弾性イベントとよぶ。

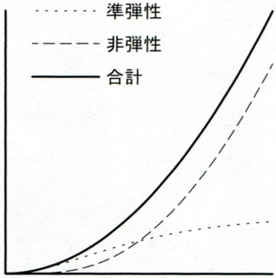
$$\text{ニュートリノ} + \text{中性子} \longrightarrow \text{ミューオン} + \text{陽子} + \text{パイ中間子}$$

ニュートリノのエネルギーが高くなると，準弾性イベントよりも非弾性イベントが起こる確率が高くなる。この点については今ではしっかり理解されている。中性子はクォークからできており，衝突するのは基本的にニュートリノとクォークだからである。エネルギーが十分高いと，ニュートリノが中性子をバラバラに壊してしまうので，その破片がパイ中間子となって飛び出して，非弾性イベントになる。原子核中のほかの核子がどうなるかを無視したように，中性子中のほかのクォークがどうなるかは考えなくてよい。原子核が壊れるよりも中性子が壊れるほうが複雑だが，本質的な差はない。だが昔はそのことがわからなかったし，1963年の時点ではクォークの存在自体が思いもよらないものだった。

次の図はニュートリノのエネルギーによって，ニュートリノイベントの数が変化するようすを描いたものだ。ここでは，ニュートリノのエネルギーが変わっても，ニュートリノのフラックスは同じだと仮定している(もちろん，実際の実験では違うが，その点は考慮するのは簡単だ)。エネルギーが低いときには，準弾性イベントだけが可能である。始めのうちはニュートリノのエネルギーが大きくなると準弾性イベントの数も急激に増加する[a]が，しばらくすると一定になる。エネルギーが大きくなると非弾性反応が可能になり，エネルギーがさらに増加するとともに，出てくるパイ中間子の数も増える。非弾性イベント数の増加は，準弾性イベント数が増えなくなった分をほぼ打ち消し，全イベント数は低いエネルギーのときと同じく急激に増加する。イベント数のこの変化は，ニュートリノが中性子中のクォークとぶつかり，エネルギーが高くなるにしたがって，壊れた中性子や陽子からパイ中間子がたくさんつくられると考えれば，おおまかに理解できる。基本となる反応はいつも同じ(ニュートリノとクォークの散乱)で，その確率はニュートリノエネルギーとともに増加するのは見てきたとおりである。

強調するために，この図には少しごまかした部分がある。エネルギーが低いときには，始めにあるのが中性子ならば，準弾性イベントだけが起きる。ニュートリノが陽子にぶつかるときには，電荷の保存則のため，準弾性イベントは起きない。ミューオン数は保存されるので，ニュートリノは負の電荷をもつミュー

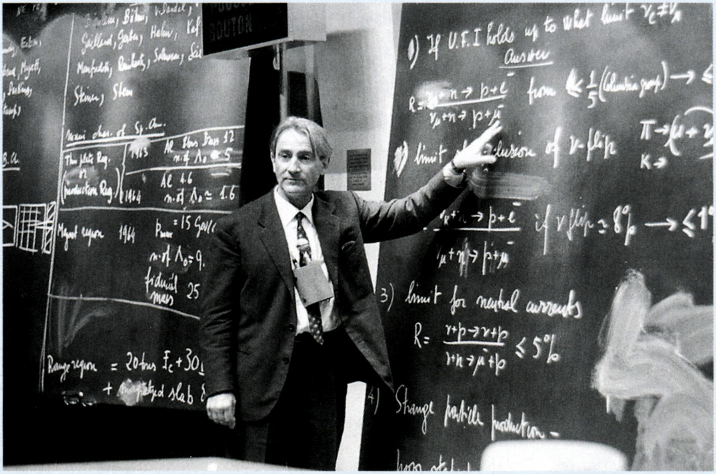
[a] ニュートリノのエネルギーの2乗に比例する。



オンに変わる。したがって，正の電荷をもつ陽子は正電荷を2つもつ核子にならなければならないが，そんなものは存在しない。質量が1000 MeV以下の核子は，陽子と中性子だけである。非弾性イベントの場合には，π^+が1つ余分に出ればよいので，この問題は起きない。つまり始めにあるのが陽子の場合でも，非弾性イベントは可能なので，正しい図を描きたいときには考慮してほしい。

7.7 終わりに

生成領域のスパークチェンバーの写真はセルンの戸棚のどこかに眠ったままで，調べようとする人は誰ひとりいなかった。1971年にセルンを訪問した私は，その写真を見てみることにした。当時進展を見せていた弱い相互作用の理論にとって，中性カレントが重要だということがわかってきたからだ。しかし最後に見かけた場所を探しても，何も見つけられなかった。すでに燃やされていたらしい。嘆かわしい話である。



ジルベルト・ベルナルディーニ（Gilberto Bernardini, 1906–1995）　私がニュートリノ実験に興味をもちはじめた 1963 年，実質的なボスがベルナルディーニだった。私が彼と関わるようになったのは，セルンの実験における *W* 生成の計算（リー，マークスタインとヤンが最初に行った）をやり直していたからだ。ベルナルディーニと私は，すぐに仲良くなった。もちろん，イタリア人どうしのように良い友達になるのは簡単ではない。言葉，単語の選び方やイタリア文学についての知識を，私は洗練しなければならなかった。ベルナルディーニは教養溢れた人物だった。

よくセルンの廊下を一緒に歩いたものだった。ときたま，彼が私の腰に腕を回すのでとても恥ずかしかった。（私から見て）小さなイタリア人の彼と，はるかに若く少々いかついオランダ人の私の組み合わせは，珍しい光景だったに違いないから。だが，私たちはあるものを共有していた。物理に対する情熱である。実験開始当初の興奮が冷めてしまうと，夕方や夜には，スパークチェンバーグループの人たちは姿を消すようになった。ベルナルディーニと私は，*W*，いや，もしかすると思いもしないすばらしいものが見つかるかもしれないと思いながら，毎晩スパークチェンバーの写真を見つめていた。期待に胸弾むときだった。

ちょっと有名な上の写真は，当時のひとコマである。中性カレントの割合 R は 5% よりも少ないと書いてある（彼の腕の下で腰の高さあたりにある式）。だが実際には約 15% だった。泡箱の写真を誤認したことによる誤差であった。この数字を訂正する論文が出版されたのは，中性カレントの存在を要求するゲージ理論の流行（1971 年のアムステルダム会議以降）より早かった。

8 粒子動物園

8.1 序　　論

1960 年頃，素粒子物理学は混迷をきわめた状況にあった。すでに知られていた光子や電子，ミューオンやニュートリノなどの素粒子[a] 以外にも，多くの粒子が次々と発見されていった。新たな実験を行うと，必ず新粒子が見つかるといった具合である。新粒子に共通していたのは，強く相互作用する性質だった。どの粒子も，陽子や中性子と非常に強く相互作用する性質をもっていたのである。だが光子，電子，ミューオンそれにニュートリノは違った。ミューオンは，原子核に衝突せずに飛ぶことができる。電気的に中性のニュートリノなら，相互作用せずに，大量の物質を通り抜けることが可能だ。だから新粒子達は，おおまかには，陽子や中性子と同じ仲間に属すると思われていた。謎に包まれているという点では，陽子や中性子も同様で，複雑な複合状態だと考えられていた。事態が一変するのは，陽子や中性子を含むこれらの粒子を分類する方法が考え出されてからである。この分類法によって，混乱状態は大幅に改善されることになる。当時の素粒子理論界における主役はゲルマンだった。系統立てて分類する研究における彼の功績は偉大である。大量の実験的，理論的研究の成果が，クォークの導入に結びついた。さらに，新しく発見された粒子が，陽子や中性子と同じく，クォークの束縛状態だということもわかってきた。本章の主題は，クォークの束縛状態である。クォークの束縛状態は多種多様である。ここでは粒子動物園とよぶことにしよう。束縛状態は粒子だが，素粒子ではな

---

[a] もうそれ以上細かな構造をもたない粒子を素粒子とよぶ。



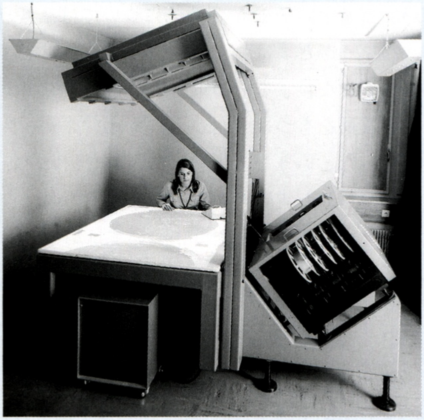
ルイ・アルバレ(Luis Alvarez, 1911-1988)　アルバレが泡箱の有用性に気がついたのは，グレーザーが泡箱を思いついて間もない頃だった。アルバレ自身も，相当の労力を注いで泡箱をつくり，物理学の研究に応用した。バークレーの彼のグループには，有能な技術者と物理学者(区別がつかないこともある)が多く，比較的大きな(長さ 10 インチ＝25 cm)水素泡箱をつくり，物理学上の大きな成果を得た。この章で述べる数多くの粒子を発見したのである。アルバレは 1968 年のノーベル賞を受賞した。

バークレーグループは，さらに大胆な一歩を踏み出した。当時のお金で 250 万ドルもする，はるかに大型の水素泡箱(72×20×15 インチ＝183×51×84 cm)の建設を決めたのである。だが，課題も山積みだった。液体水素(または重水素)は−250℃ に保たなければならない。泡箱を囲む巨大な磁石は 100 トンもあり，200 万ワットの電力が必要だった。

72 インチ泡箱の最初の成果を出したのは，ジョンズ・ホプキンズ大学のペヴスナーのグループだった。ベバトロン(バークレーにあった 6 GeV の加速器)から，重水素を満たした泡箱にパイ中間子ビームを照射したのである。撮った写真は，ジョンズ・ホプキンズ大学に送って解析した。そしてエータ(η)中間子が発見され，この章で述べる 8 個の中間子がすべて揃うことになった。

アルバレと，当時のローレンス・バークレー国立研究所(LBL)の所長だったエドウィン・マクミラン(Edwin MacMillan)の関係は険悪で，物理の研究にも影響を及ぼすほどだった。よくある話だが。





エイフド・ペヴスナー(Aihud Pevsner, 1925)と，1972年頃のセルンのスキャン台。素粒子の実験的研究を行っている所では必ず，写真のような装置を使っていた。大加速器のある研究所で実験を行い，膨大なフィルムにデータを記録する。各大学の研究室では，それらのデータの一枚一枚に人間が目を通して詳細な分析を行った。記録された画像は100万枚ほどもあり，調べる作業は，退屈で長い道のりだった。この種の作業を行う物理学者は，実験家というよりも管理者に近い。多くの場合，調べる作業に携わっていたのは，物理学からは縁遠い若い女性達だった。

この種の物理学が進歩に欠かせないことは事実である。だが，素粒子物理学を退屈で，興味のもてないものにしていることも確かだ。スキャン台を使って一枚一枚の写真からデータを取り出し，磁気テープに記録してコンピュータ処理しやすいようにする。そしてコンピュータで集計してから，グラフやヒストグラムに変換する。作業が面白味を取り戻すのは，このあたりからである。新しいパターンが見つかれば，新粒子の発見だ。新粒子は，どれもこれも非常に不安定で，一瞬のうちに崩壊してしまう。だが，崩壊後に出てくる粒子を解析すれば，新粒子の存在を証明することができる。例えば，ジョンズ・ホプキンズ大学のペヴスナーのグループは，バークレーの72インチ水素泡箱に，パイ中間子ビームを照射して撮影した画像を手に入れた。ペヴスナー達はパイ中間子3個の組み合わせを探し，それらのパイ中間子3個が，ある単一粒子(η粒子)が崩壊してできたものと考えられるかどうかを調べた。泡箱には磁場がかけてあり，荷電粒子は磁場で曲がる。飛跡の曲率から，粒子のエネルギーがわかる。さらに粒子のエネルギーからη粒子の質量(約550 MeV)が計算できる。だが，3個のパイ中間子の組み合わせすべてがη粒子の崩壊でつくられるものとは限らない。だから，実際には，この解析はそれほど簡単なものではない。

い。パイ中間子や K 中間子については，もう説明済みである。

クォークとよばれる仮説上の粒子を使えば，理論的には，これまで出てきたさまざまな粒子をその束縛状態として説明することができる。実在の粒子は一定の質量をもつはずだが，当時は，クォークが実在の粒子だという証拠は何もなかったということは忘れないでほしい。転機となったのは，1967 年にスラックで行われた実験だ。陽子や中性子の中に点状の粒子の存在することが示されたのである。このあたりについては第 11 章で述べることにしよう。

8.2 束縛状態

なんといっても厄介だったのは，クォークが自由粒子として単独では出てこないことである。この問題は，現在でも完全には理解されていない。クォークは，束縛状態の中だけに存在する。この点が第 1 の関門だ。さらに，クォークどうしの束縛状態のでき方は原子や原子核などの束縛状態とは大きく異なっており，理解が進むまでに長い時間が必要だった。これが 2 番目の困難だ。しばらく，この点について説明していこう。

水素原子の場合，構成要素の陽子や電子は簡単に見分けられる。結合エネルギー[†]が比較的小さいので，原子全体のエネルギーは電子と陽子の質量エネルギーを加えたものに非常に近いからである。

> 正確には，電子と陽子の質量はそれぞれ約 0.511 MeV と 938.272 MeV，結合エネルギーは -13.6 eV $= -0.000\,0136$ MeV だ。原子を引き離すにはエネルギーを加える必要があるので，結合エネルギーは負の値をとる。質量エネルギーと比較すると，結合エネルギーはほとんど 0 といってもよいくらいである。だから水素原子の質量は，電子と陽子の質量の和に近い値をとる。

結合エネルギーの値が，かなり大きくなる点を除けば，原子核の場合もよく似ている。そうはいっても，陽子と中性子の質量に比べれば，原子核の結合エネルギーはまだまだ小さい。

---

† （訳者注）束縛状態のエネルギーから，構成粒子の質量エネルギーを引いた量を，結合エネルギーまたは束縛エネルギーという。

ヘリウムを例として考えてみよう。ヘリウム原子核は，陽子2個と中性子2個からできている。それぞれの質量は938.272 MeV，939.563 MeVなので，ヘリウム原子核の質量エネルギーは3755.67 MeVになる。ヘリウム原子核の結合エネルギー(原子核を，陽子と中性子とに分離するのに必要なエネルギー値の符号を逆にしたもの)は，−28 MeVである。つまり総エネルギーの約0.7%が，結合エネルギーである。原子核の結合エネルギーは，個々の原子核によって若干違う。通常の場合は，核子1個あたりの結合エネルギーを用いる。ヘリウムの場合は，だいたい$-28/4 \approx -7$ MeVである。

これまでの話から明らかなように，原子核中の陽子や中性子の数は簡単にわかる。単に質量を量ればいいのだ。だから，原子核が陽子と中性子の束縛状態であることはすぐにわかる。だが，クォークの束縛状態の場合は話が違う。

クォークの束縛状態は実に複雑な構造である。クォーク間の強い相互作用を媒介しているグルーオンは，自分たちどうしでも相互作用する。そのためにグルーオンのかたまりができて，クォークどうしを結びつける役割を果たしている。グルーオン自体は質量をもたないが，エネルギーをもつ。グルーオンのかたまりがもつエネルギーは相当大きく，束縛状態の質量を生み出す元になっている。クォークはグルーオンに埋め込まれているようなものだ。束縛状態の質量のうち，クォークの質量が寄与する部分はほんのわずかだ。例えば，陽子はアップクォーク2個とダウンクォーク1個からできている。陽子の質量は938.27 MeVだが，これらのクォークの質量の合計はたった15 MeVしかない。残りの923 MeVはグルーオンのかたまりの分である。このような状況では，結合エネルギーについて語ることさえ難しい。その上，陽子を構成するクォークは引き離してバラバラにはできない。クォークを引き離そうとすればするほど，クォーク間にグルーオン物質が集まるため，エネルギーが必要になる。このエネルギーはクォークを遠く引き離せば離すほど，ますます増大する。このような結合の仕方はほかでは類をみないものであり，何が起こっているかを理解するのは大変難しい。

明らかに，このような状況で，クォークの質量を決定するのは並大抵のことではない。ある程度使いものになる理論の中には，クォーク質量を扱っているものも多い。しかし，当然ながら，特にアップクォークとダウンクォークに関

しては不確かな点が多い。だが，少なくとも陽子(uud)と中性子(udd)の質量差1.291 MeVから，アップクォークとダウンクォーク間の質量差を推測することはできる。クォークとグルーオンによる構成については，陽子と中性子はよく似ている。主な相違点は電荷である。電気力によるエネルギーも考えなければならない。アップクォークとダウンクォークの質量差は，1.5から4 MeVほどだろうと推定されている。

重いクォークを考慮しだすと，状況は一変する。重いクォークを含む束縛状態の発見は，1967年以降のことであり，クォークが仮説上の粒子か実在の粒子かという議論は，重いクォークとは関係がない。重いクォークとよばれるのは，チャーム，ボトム，トップクォークで，質量は，それぞれ約1.3，4.5，そして175 GeV (1 GeV＝1000 MeV)だ。グルーオンのかたまりのエネルギーと比べると，これらのクォークの質量はとても大きい。だから，それぞれの束縛状態の中に，重いクォークが何個含まれているかを推測するのは簡単である。1974年，スラック(スタンフォード)とビーエヌエル(ブルックヘブン)において，初めて重いクォークを含んだ束縛状態が発見され，新粒子として認定された。スラックではψ，ブルックヘブンではJと名づけられたこの粒子は，両方の名前を並記してJ/ψ粒子とよばれている。このとき発見されたJ/ψ粒子の質量は約3000 MeVで，後にチャームクォークと$\overline{\text{チャーム}}$クォークの束縛状態であることが判明した[b]。J/ψ粒子の質量は3096 MeV，クォーク質量の総和は約2600 MeVだ。つまりグルーオンのかたまりの質量は，約500 MeVということになる。クォークの束縛状態において，グルーオンのもつエネルギー量は，場合によって変わるが，だいたい120から1000 MeVである。

これまでの議論で明らかだと思うが，観測された粒子(アップ，ダウン，ストレンジクォークだけを含む場合に限る)が，クォークと反クォークのどんな組み合わせであるかを見極めるのは，かなり難しい。

---

b　上に引いてある線は反粒子を示すことを思い出してほしい。

8.3 クォークの束縛状態の構造

今日では，陽子はグルーオンのかたまりとその中を泳ぐクォーク 3 個からできていると考えられている。では，クォークの入っていない，グルーオンだけのかたまりも存在するのだろうか？　実は，その可能性も示唆されている。グルーオンのかたまりは暫定的にグルーボールとよばれているが，今のところ，存在に関する確実な実験的証拠は得られていない。クォークは，不可欠な構成要素のような気もする。

グルーオン間相互作用やグルーオン-クォーク相互作用，あるいはグルーオン自身に関する物理学は，量子色力学(QCD)とよばれている。複雑な問題なので本書では詳しくは述べない。ややこしくなる理由は，前に述べたとおり，種々のグルーオンがお互いに複雑に相互作用し合う点にある。この相互作用のおかげで，グルーオンの大きなかたまりが存在できるのである。チューインガムに似ているかもしれない。このたとえを，もう少し続けよう。束縛状態にあるクォークと反クォークを引き離すとどうなるのだろう，と思う人もいるかもしれない。クォークを引き離すと，クォークと反クォークの間には，グルーでできたひもができる[†]。チューインガムを伸ばした様子とよく似ている。チューインガムはちぎれるけれど，グルーオンのひもは伸び続ける。おかしなことに，どれほど引き離しても，クォークと反クォークを結びつけている力の大きさはほぼ変わらない。距離の影響を受けないようだ。今日ではたいていの素粒子物理学者はこのように考えているが，力が本当に一定だというきちんとした証明があるわけではない。いずれにしても，クォークと反クォークを引き離すことは不可能である。グルーオンのひもに関しては，数多くの実験や理論的研究が行われてきたが，難しいことに変わりはなかった。非常に複雑な状況を近似的に表した状態が，グルーオンのひもからクォークやグルーを取り去って，ひも状の物体へと理想化・抽象化したひも理論[††]である。理論自体は広く研究されているけれど，クォークを引き離したときのグルーオン物質を近似的に表すひも以外には，自然界にひもが現れる証拠は見つかっていない。

---

† (訳者注)グルーは接着剤のこと。クォークを接着する粒子という意味でグルーオンという名前が使われる。

†† (訳者注)弦理論ともいう。

もう少し詳しく見ていこう。量子力学が登場した頃，この理論が最初に適用された重要な問題は水素原子だった。陽子と電子の間の電気的引力から出発したのである。この力，つまりクーロン力は遠く離れると急速に弱くなる。正確には，距離の 2 乗に反比例して弱くなる。電子と陽子をある距離隔てて置くと，お互いに引き合う。距離を 2 倍にすると，引き合う力は 4 分の 1 になる。

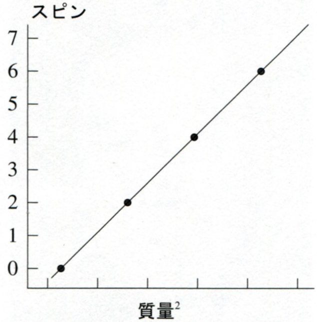
クーロン力に量子力学を適用すると，電子と陽子の束縛状態にはさまざまなものがあることがわかる。水素原子の励起状態のことである。励起状態の水素原子とは，電子が外側の軌道を回る状態のことをいう。外側の軌道を回る電子ほど大きなエネルギーをもつ。陽子の周りを回る電子は，外側の軌道から内側の軌道に落ちるときに光子を放出する。このときに放出される光子のエネルギーは，これらの束縛状態間のエネルギー差に等しい。つまり，励起状態の水素（水素原子に電子をぶつければできる）から放出された光子のエネルギーを測定していけば，励起状態の正確なエネルギーがわかる†。励起状態の水素とは，電子が外側の軌道を回っている水素のことだ。実験的に観測された水素の光学スペクトルは，クーロン則の場合に量子力学を用いて計算した束縛状態のエネルギーと，ぴったり一致する。クーロン則を知らなければ，まずスペクトルを観測し，次にどんな力の法則に対してスペクトルの観測結果が再現できるかを調べて，クーロンの法則を探し出すしかない。この方法を用いて調べられたのがクォークの束縛状態である。

クォークの束縛状態が 1 つあれば，付随して，高いスピンと大きな質量をもつ束縛状態が存在するという証拠も，わずかながら存在する。スピンを縦軸に，質量を 2 乗したものを横軸にとって，そのような束縛状態を図示すると，ほぼ直線状に並ぶように見える。

イタリアの物理学者，レッジェ（T. Regge）にちなみ，この直線をレッジェ軌跡という。クォークと反クォークからなる束縛状態のスペクトルがこのようになる原因は，クォークと反クォークの間にはたらく力が距離によらず一定になるためだと考えられる。力が距離によらずに一定になるのは，クォークと反クォークの間に，グルーオンがひも状の配位をつくるためだと解釈されている。

---

† （訳者注）正確にはエネルギーの差がわかる。一番エネルギーの低い状態（基底状態）から電子をはぎ取るのに必要なイオン化エネルギーを測れば，基底状態のエネルギーがわかるので，励起状態のエネルギーを計算することができる。



ひも理論はこのようにして，レッジェ軌跡から生まれた。最近レッジェ軌跡について語る人が少なくなったのは，高いスピンをもつ束縛状態を実験的に見つけるのが難しいからではない。レッジェ軌跡が流行していたとき(1970年頃)，確かに多くの理論家が，レッジェ軌跡に関するいろいろな論文を発表していた[c]。だが大半の論文では，1，2個の点だけをもとに直線だと仮定して線を引いていただけだった！

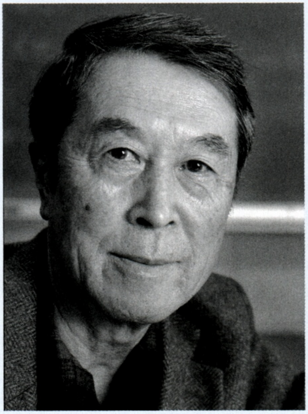
これまでに見つかったたくさんの束縛状態について述べても意味がないだろう。軽いクォーク，つまりアップ，ダウン，ストレンジクォークの束縛状態に話を絞って進めよう。なかでも，もっとも質量の軽い状態だけを見ていこう。これらの粒子は1948年から1965年にかけて発見された。まず，中間子(メソン)とよばれるクォークと反クォークの束縛状態，それにクォークが3個束縛されている状態の重粒子(バリオン)について説明しよう。重クォーク(チャーム，ボトム，トップ)を含む束縛状態については，その後で簡単に説明するつもりである。

8.4　束縛状態のスピン

束縛状態は素粒子ではないが，粒子の一種だと考えてよい。ちょうど原子を粒子と考えるのと同じである。すべての粒子はスピンをもつ。これは内部におけ

---

c　ちょうど最近のひも理論のようだ。



南部陽一郎(Yoichiro Nambu, 1921)　レッジェの考え方の成功を，クォーク間にはたらく力という視点で解釈し直したのが南部である。彼は量子色力学の発展にも多大な影響を与えた。共同研究者のハン(Han)とともに，クォークの色という考え方の基本をつくりあげ，さらに今日我々がグルーオンとよんでいる粒子を導入したのである。現在の洗練された形，つまり，標準モデルの一部となっているクォークとグルーオンの相互作用に関する理論(量子色力学)からみれば，彼らの研究はだいぶ異なっている。とはいえ彼らの論文の中には，紛れもなく現在の理論の原型がある。さらに南部には，ほかにも重要な功績がある。

南部は，ヨナ-ラシニオ(Jona-Lasinio)とともに，真空を特徴づける中性の場の存在を提唱した。この中性の場を直接実験で観測するのは確かに難しい。だが，中性の場を用いれば，たくさんの実験事実が説明できることは事実だ。このアイデアが基礎となって生まれたブロウト(Brout)，アングレア(Englert)，ヒッグス(Higgs)の仕事は，後にゲージ理論の基本となった(第 10 章参照)。

90 年代のいつだったか，思いがけず南部と出会ったことがある。当時の私は，トップクォークの質量とヒッグス粒子の質量の関係式について考えている最中だった。今でこそトップクォークが発見されているが，当時はどちらの粒子も未発見だった。トップクォークの質量が十分に重ければ，関係式はとても単純で，ヒッグス粒子の質量はトップクォークの 2 倍になる。そんな頃，フェルミラボで偶然にも南部と出会ったのである。南部は，その頃私と同じ式を導いていただけでなく，ヒッグス粒子はトップクォークと反トップクォークの束縛状態だと考えていた(だからヒッグス粒子の質量はトップクォークの 2 倍になる)。現状がどうなっているか聞くために，一緒に実験家を訪ねたのだが，今に至るまで，返事は来ないままである。我々は，今でもヒッグス粒子の発見を待ち望んでいる。

る回転状態だと考えてもよいだろう。自転しているテニス球のようなものだ。しかし小さな粒子レベルでは，量子効果を忘れずに考慮しなければいけない。自転すなわちスピンは，もともと決まったいくつかの値しかとることができない。つまりすべてのスピンは，ある基本となる量の整数倍，あるいは半整数倍の値だけをとる。基本となる量を単位として考えると，スピンのとる値は 0，$\frac{1}{2}$，1，$\frac{3}{2}$，2，$\frac{5}{2}$ などである。束縛状態のスピンは，構成粒子のスピンの差（の絶対値）か和，もしくはその間の数に，整数を加えたものに等しい[d]。余分の整数を加えるのは，構成粒子がお互いの周りを回転運動している効果を加えなければならないからである。負のスピンは存在しない。スピンは単に回転の大きさを表すので，0 になることはあっても，0 より小さくはなることはない。まとめると，全回転量というのは，クォーク自身の内部回転（クォークのスピン）と，それらのクォークどうしがお互いに回りあっている回転の総計である。この説明は単純化しすぎかもしれない。グルーオン物質も回転するからだ。しかし，グルーオンのかたまりを無視しても，最終的には上に述べたような結果が得られる。

8.5 メソン（中間子）

中間子とは，クォーク 1 個と反クォーク 1 個の束縛状態のことである。クォークと反クォークのスピンは，どちらも $\frac{1}{2}$ だ。中間子のスピンは，0，1，2 などの値をとる。まず，質量が小さくスピンが 0 の粒子から始めよう。

アップ，ダウン，そしてストレンジクォークの束縛状態だけに絞った場合，9 種類の可能性が考えられる。下表を見てほしい。1 段目はクォークと反クォークの組み合わせだ。実験的に発見された粒子の中で，それらの組み合わせだと考えられているものの記号が 2 段目に書いてある。

$d\bar{s}$	$u\bar{s}$	$d\bar{u}$	$u\bar{d}$	$s\bar{u}$	$s\bar{d}$	$d\bar{d}$	$u\bar{u}$	$s\bar{s}$
K^0	K^+	π^-	π^+	K^-	$\overline{K}^0$	π^0	η	η'

[d] 構成粒子のスピンの和が整数であるか半整数であるかによって，束縛状態のスピンはいつも整数か半整数になる。

通常，上線は反クォークを示す。つまり，$\bar{u}$ は，反アップクォーク，あるいは $\overline{\text{アップクォーク}}$ と同じ意味である。

クォークの色電荷(第 2 章参照)は, ここの議論では忘れてよい。束縛状態は, 色に関しては中性である。つまり赤クォークがあれば必ず，反赤クォークが存在するということである。束縛状態は可能な色の組み合わせ, 例えば赤と反赤, 緑と反緑, 青と反青を重ね合わせたものである。パイ中間子(π)と K 中間子(K)については，第 6 章で説明済みである。これらの素粒子は，最初の大型加速器(セルンとビーエヌエル)において大量につくられ，多くの実験の主要テーマとなった。2 行目に出てくる粒子は，どれも，クォークと反クォークの束縛状態という考えが出てくる以前に発見された。名前にもクォーク前時代の名残が見える。電荷は粒子の右上に書いてある。書いていない場合(η と η')の電荷は 0 である。

この表は厳密には正しくない。π^0 と η，それに η' は，正確にはその粒子の真上に書いてある束縛状態ではなく，それらを組み合わせたものになっているからである。例えば，π^0 は $u\bar{u}$ と $d\bar{d}$ の混ぜ合わせになっている。だが，今のところは，この点にこだわる必要はない。

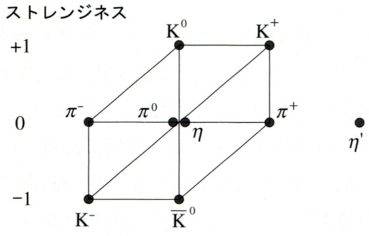
1961 年，これらの粒子を分類する方法が出現した[†]。次ページの図をご覧いただくのが手っとり早いと思うが，ゲルマンの八道説(The eightfold way)という題名の論文を皮切りに, この図は瞬く間に素粒子物理学界に広まっていった。ご覧のように, 三角形を組み合わせてつくる方法は示唆に富んでいる。実際に, この三角形は，1964 年にクォークを持ち込むきっかけとなった。9 種類の粒子は，8 重項(8 粒子)と 1 重項にまとめられる。

図中の粒子は, ストレンジネスと電荷で区別して並べてある。この分類では, 粒子のストレンジネスは，その粒子に含まれるストレンジクォークの数で決まる。例えば含まれるストレンジクォークが 1 個なので，K^- のストレンジネスは -1 だ。同じ水平線上に並んでいる粒子のストレンジネスは等しい。また,

---

† (訳者注)ゲルマンよりずっと早く，坂田昌一がいわゆる坂田モデルを提唱していた。陽子，中性子，Λ の 3 つのバリオンとその反粒子の束縛状態としてメソンを説明した。メソンが 8 重項になることは，小川修三と山口嘉夫が 1959 年に初めて提唱した。坂田モデルはバリオンが 8 重項になることを説明できなかったので，ゲルマンのクォークモデルに取って代わられた。

粒子	質量 (MeV)	寿命 (秒)
π^+, π^-	140	2.6×10^{-8}
π^0	135	8.4×10^{-17}
K^+, K^-	494	1.2×10^{-8}
K_S	498	0.89×10^{-10}
K_L	498	5.2×10^{-8}
η	547	5.6×10^{-19}
η'	958	3.3×10^{-21}

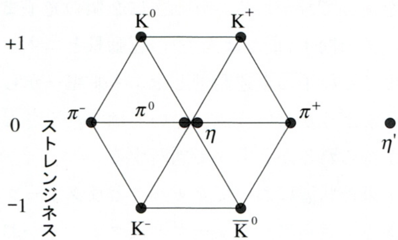


スピン0の中間子8重項と1重項

垂直方向に一列に並んでいる粒子の電荷は等しい。8重項と1重項の違いは，クォークを入れ替えたときの性質の違いを表している。η' には $u\bar{u}$，$d\bar{d}$，$s\bar{s}$ が均等に混じっている[e†]。そのためクォークをお互いに入れ替えても変わらない。例えば，d と s を，$\bar{d}$ と $\bar{s}$ と同時に交換しても，η' はそのままである。中のクォークを入れ替えたとき，1重項の粒子は変わらないが，8重項に含まれる粒子の場合，ほかの8種類のメソンに入れ替わる。例えば，上と同じ入れ替え($d\leftrightarrow s$ と $\bar{d}\leftrightarrow\bar{s}$)を行うと，$d\bar{s}$ でできている K^0 は $s\bar{d}$ の $\overline{K}^0$ に替わる。

習慣的には，8重項の図はもう少し対称な形に描く。同じ対角線上の粒子の電荷は等しい。

すべてのクォークが同じ質量をもつなら，8重項に属する粒子の質量もすべて同じになる。しかし，ストレンジクォークの質量(ストレンジクォークも同



---

e　実際には，さらにほかの混合も起こっているが，ここでの本筋とは無関係なのでふれない。

†　(訳者注)数式で表すと，$\eta'=\dfrac{1}{\sqrt{3}}\left(u\bar{u}+d\bar{d}+s\bar{s}\right)$ ということ。

じ質量をもつ)は，アップやダウンクォークの質量よりも大きい。だからストレンジクォークか反ストレンジクォークを1個含んでいるK中間子は，パイ中間子よりも重い。ηやη'には，ストレンジクォーク1個と反ストレンジクォーク1個が含まれているため，さらに重い。表中の寿命からわかるように，これらの粒子はすべて不安定である。

K_SとK_Lは，K^0と$\overline{K}^0$が一定の割合で混合したものである。いろいろな混合の話が出てきて混乱したかもしれない。しかし，混乱したのは読者ばかりではない。粒子混合の謎が解明され，理解されるまでの道程は長かった。解明済みの今となっては簡単に思えるけれど，謎を解くのは決して容易ではなかった。幸運なことに，本書の目的は細部を追求することではないので，先に進むことにしよう。

電荷をもつパイ中間子やK中間子の寿命は，比較的長い(1億分の1秒程度)ので，飛跡を目で見たり，測定することができる。中性のパイ中間子はすぐに崩壊するが，非常に巧妙な方法を使えば，崩壊までに飛ぶ距離を測ることができる。崩壊するまでに飛ぶ距離は，だいたい1ミクロン(1ミクロンは，1メートルの100万分の1)程度だ。中性のパイ中間子は，たいてい光子2個に崩壊する。

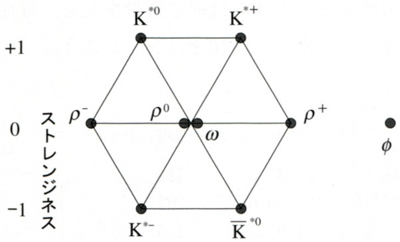
1960年頃に，泡箱のデータからペヴスナーのグループによって発見されたηは，非常に不安定である。できたそばから崩壊してしまうので，普通の検出装置ではまったく飛跡を見ることができない。この種の粒子の存在は，前に述べたマスシェル関係を使って確かめる。ηは主に2個の光子または3個のパイ中間子に崩壊する。パイ中間子(または光子)の運動量とエネルギーを注意深く測定すれば，崩壊で生じる粒子の全運動量と全エネルギーから，ηの質量が求められる。本当に粒子かどうかという点については，たくさんのイベントを集めたときに同じ質量が得られるかどうかで判断する。

上で述べたのは，束縛状態においてクォークと反クォークのスピンが互いに反対向きの粒子である。さらに，クォークと反クォークがお互いに回転していない，特別に簡単な束縛状態でもある。同じくらい簡単な束縛状態なのが，相対的に回転はしていないが，スピンが同じ方向を向いている場合である。このときスピンは1になる。次の表は，これまでに見つかっているスピン1の粒子をまとめたものである。

$d\bar{s}$	$u\bar{s}$	$d\bar{u}$	$u\bar{d}$	$s\bar{u}$	$s\bar{d}$	$d\bar{d}$	$u\bar{u}$	$s\bar{s}$
K^{*0}	K^{*+}	ρ^-	ρ^+	K^{*-}	$\overline{K}^{*0}$	ρ^0	ω	ϕ

スピン1の粒子も，8重項と1重項にまとめられる。どの粒子の寿命も非常に短いので，次の表には載せていない。

粒子	質量(MeV)
ρ^+，ρ^-	770
ρ^0	771
K^{*+}，K^{*-}	893
K^{*0}，$\overline{K}^{*0}$	893
ω	783
ϕ	1019



スピン1の中間子8重項と1重項

8.6　バリオン(重粒子)

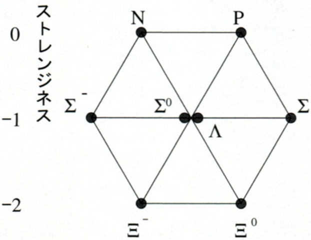
この節では，バリオンについて説明しよう。バリオンは3個のクォークからできている。スピンに関しては中間子の場合よりも複雑なので，あまり詳しくは述べない。よくわかっているバイオンには，2種類ある。ひとつは8個のスピン$\frac{1}{2}$の粒子で，この場合には2個のクォークのスピンが上向き，1個のクォークのスピンは下向きになっている。もうひとつは，10個のスピン$\frac{3}{2}$の粒子で，3個のクォークのスピンが同じ方向を向いている。中間子のときと同じく，8個の粒子は8重項にぴったりと当てはまる。10個の粒子は10重項とよばれ，新たな図形に対応する。1重項は存在しない。

中間子の場合には，反粒子も同じ8重項に入っていた。例えば，K^-とK^+はお互いに相手の反粒子になっているが，同じ8重項に属している。

バリオンは3個のクォークの束縛状態である。例えば，陽子は2個のアップクォークと1個のダウンクォークからできている。反バリオンは，反クォークからできている。例えば，反陽子は反アップクォーク2個と反ダウンクォーク1個からできている。反バリオンは，それ自身で8重項や10重項をつくる。

ストレンジネスが小さい粒子を下に置くという規則に従って図示すると，反バリオンの図は，バリオンの図の上下をひっくり返したものになる。反ストレンジクォークのストレンジネスは+1なので，ストレンジネスが0または負の粒子よりも，上に置かねばならないからだ。Ω^-はストレンジクォーク3個からできており，ストレンジネス−3，電荷−1をもっている。反対に，$\overline{\Omega}^-$は3個の反ストレンジクォークからなるので，ストレンジネス+3，電荷+1をもつ。反バリオンとバリオンは同じ質量をもち，寿命も等しい。ここでバリオン8重項に戻って，その表と図を示しておこう。

粒子	質量(MeV)	寿命(秒)
P(陽子)	938.3	安定
N(中性子)	939.6	887
Σ^-	1197.4	1.5×10^{-10}
Σ^0	1192.6	7.4×10^{-20}
Σ^+	1189.4	0.8×10^{-10}
Ξ^-	1321	1.6×10^{-10}
Ξ^0	1315	2.9×10^{-10}
Λ	1115.7	2.63×10^{-10}



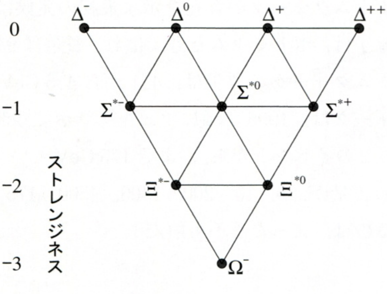
スピン$\frac{1}{2}$のバリオン8重項

陽子は安定だ。そうでなければ，あなたがこんな本など読んでいられるはずはない。中性子は非常に長生きで10分間ほど生きる。陽子と中性子の間に質量の差がほとんどないので長生きなのである(約1.3 MeV)。原子核のほんのわずかな結合エネルギーで，この小さな質量差は帳消しになるので，原子核の中の中性子は安定だ。ウランより軽いほとんどの原子核は，中性子をたくさん含んでいるにもかかわらず安定である。この表に載っている粒子のうち，Σ^0以外の粒子は十分長生きするので，普通の測定装置を使って，走った距離を測ることができる。Λは中性なので飛跡を残さないが，陽子と負のパイ中間子に崩壊すると泡箱で観測することができる。このとき，Λがつくられた場所から離れたところにV字型の飛跡が現れる。そのためΛは，最初の頃(50年代)V粒子とよばれていた。Λはストレンジクォークを1個含んでいる。

次にスピン$\frac{3}{2}$のバリオン10重項を見てみよう。寿命はあまりに短いので，表には書いていない。下にいくほど，ダウンクォークがストレンジクォークで

置き換えられる個数が増える。Σ は 1 個，Ξ は 2 個，Ω は 3 個のストレンジクォークを含んでいる。

粒子	質量(MeV)
Δ	1232
Σ^*	1383
Ξ^*	1532
Ω^-	1672.5
質量差	
$\Sigma^* - \Delta$	151
$\Xi^* - \Sigma^*$	149
$\Omega^- - \Xi^*$	140



スピン $\frac{3}{2}$ のバリオン 10 重項

それに対応して，ストレンジクォークの重さの分，下にいくほど質量が増えるはずである。この表では，150 MeV 程度の増加が見られる。ところがパイ中間子と K 中間子の質量差は 350 MeV なので，ストレンジクォークの質量を正確に決めるのは容易ではない。多分，60 MeV から 170 MeV の間だと思われる。この程度しかわかっていないこと自体，クォークの束縛状態に関する我々の理解が進んでいない証拠である。

歴史的には，Δ は 1952 年にフェルミによって発見された。初めて発見された非常に不安定な粒子である。物理学者がこれほど寿命の短いものを粒子と認めるには，しばらく時間がかかった。今から思えば，非常に不安定というだけなのだけれど。

8.7 その他のクォーク

チャーム，ボトムやトップクォークを含む束縛状態を見てみよう。最初に発見されたのは，J/ψ 粒子で，チャームと$\overline{\text{チャーム}}$の束縛状態だった。チャーモニウムともよばれ，質量は 3097 MeV だ。初めて発見されたチャームクォークを含む状態である。重要なのが B 粒子だ。1 個のボトムまたは$\overline{\text{ボトム}}$を含み，B^+，B^-，B^0，$\overline{B}^0$ があり，どれも 5279 MeV 程度の質量をもっている。B 粒子に関しては非常に精力的な研究が行われている。崩壊の仕方を調べると，

CKM 回転の4番目の角度がわかるからだ(第3章を見よ)。この角度はCP対称性の破れと関係しているが，この本では立ち入らない。

ボトムクォークの存在を示す最初の兆候はϒ(ウプシロン)の発見だった。この粒子は，ボトミウムともよばれ，質量は9460 MeVである。この質量を元に，ボトムクォークの質量は，4.1から4.5 GeVの間だと推測された。一方トップクォークは，1995年頃にフェルミラボで観測されたイベントで初めて姿を現した。このイベントから，およそ175 GeVという質量が導かれたのである。クォークの質量が，5，10，200，1300，4500，175 000 MeVと，極端に変化に富んでいるのは，まったく不可解だ！

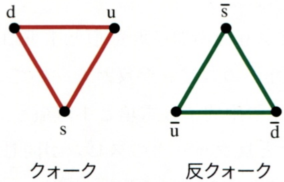
8.8 クォークの発見

これまで説明してきたのは，1964年頃の状況である。当時，クォークは8重項，10重項などの多重項にまとめられるように見えた。だが，まだ見つかっていない空白の場所があった。その空白に当てはまる粒子が実際に発見された瞬間，この分類法は確かなものになった。最後まで見つからなかったバリオン10重項のΩ^-が発見されたのはブルックヘブンの泡箱実験である。この粒子の質量は，かなり正確に予言されていた。予言といっても，すでに見つかっていたΞ^*の質量に，単純に150 MeVを加えただけだったのだが，実際にその通りだったのである。

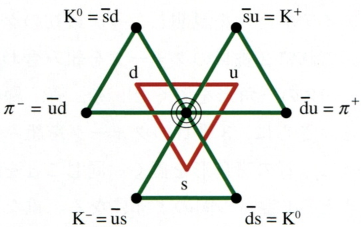
この段階で，これらの粒子をもっと基本的なものの束縛状態だと考えるのは，まったく自然なことである[f]。実際，ゲルマンとツバイクは，そのようにしてクォークを考え出した。実に単純なアイデアだ。多重項の図を見れば三角形が構成要素になっているのは一目瞭然である。このときの規則は，先ほど述べた通りである。下方に向かうとストレンジネスが小さくなり，右に向かうと電荷が増える。つまり反クォークを表すには，次図に示すように，上下をひっくり返した三角形を用いなければならない。

---

[f] これは決して簡単という意味ではない。半端な電荷をもち，見たこともない粒子を導入するには，知的勇気が必要だった。



この三角形の粒子が，クォークと反クォークである。クォークと反クォークを組み合わせると，9個のスピン0の中間子ができる。とても簡単だ。まずクォークの三角形から始めよう(上の図の左)。3つの頂点に，反クォークの三角形(上下をひっくり返した三角形)を置く。このとき反クォークの三角形の中心を，ちょうどクォークの三角形の頂点に重ねる。すると下の図に示すように，8重項と1重項が現れる。



中心の3重丸は，すべての反クォーク三角形がそこで重なっている，つまり，その場所に3つの組み合わせ(状態)が重なっていることを示している。この3個の状態のうち2個は8重項に属するが，1個はそれだけで1重項になる。

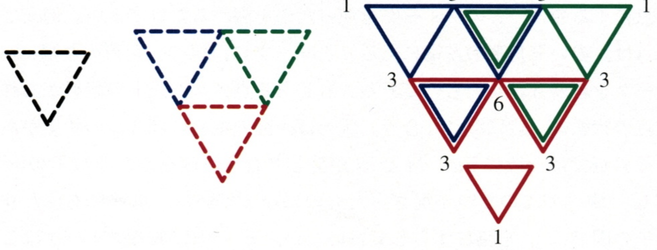
このやり方で，どの状態にどんなクォークが入っているかがすぐにわかる。その点にくるのに，どのクォークを使ったかを調べるだけでよい。例えば1番左の点は，赤い三角形の左端にある d クォークに，緑の三角形の左端にある $\overline{u}$ クォークを組み合わせたものである。もしある点に2つ以上の状態があれば，その点の状態は一般に混じり合う。例えば，図の中心には3つの状態があるので，その点では一般に $\overline{u}u$，$\overline{d}d$ と $\overline{s}s$ が混じり合う。観測される粒子の π^0，η と η' は，すべてこの3つが混ざったものになっている。以前にあげた9つの中間子の図では η' を脇にずらして書いたが，η' の中にあるクォークはここに

示した図の中心に対応する。

図に示したように，スピン0の中間子8重項と1重項は，クォークと反クォークの束縛状態であり，お互いのスピンが反対を向いているため，全スピンは0になっている。スピンが1の中間子8重項と1重項も，同じようにしてつくることができるが，クォークと反クォークのスピンが同じ方向を向いているため，全スピンが1になる点だけが異なっている。

バリオンの場合にはもっと複雑になるが，図を見ると，やはり三角形の組み合わせになっていることがわかる。中間子のときと同じように考えると，バリオンをつくるときには，3×3×3=27個の状態ができる。8重項や10重項(全部で18個の粒子)が，ここからどうして出てくるかはすぐにはわからない。その点を明らかにするには，クォークを入れ替えたときに，お互いに移り変わるグループを見つけなくてはならない。中間子のときには，9個の状態が，8重項と1重項に分かれた。だが，やり出すと大変だし，急を要する作業ではない。

次の図を使って，アイデアだけを説明しよう。最初のクォークの三角形は黒い点線で描いてある。これに2番目のクォークを組み合わせる。黒い三角形の頂点に，1つずつクォークの三角形を置くと，赤，青，緑の点線で書かれた真ん中の図形が得られる。さらに，3番目のクォークを組み合わせる。青の点線で示す三角形の各頂点に，青の三角形を置く。同じことを，赤と緑の点線で示す三角形に対して行うと，1番右の図のようになる。重なった三角形を区別するために，少し大きさを変えて描いている。この図の色は，第2章で述べたクォークの色電荷とは，まったく関係がないことに注意してほしい。単に見やすくしようと色を付けただけである。



前ページの図では，いくつかの点が何回か現れる。図に示した数字は，何回その点が出てきたかを表している。例えば1番上の辺の2番目の点には，青の三角形が2回と緑の三角形が1回重なっているので，合計3つの状態がある。数字の6と書いてある真ん中の点は，赤，青，緑の三角形がそれぞれ2回ずつ重なっているので，合計6個の状態がある。結果としては，10重項が1回，8重項が2回，1重項が1回現れる。したがって

$$10 + 8 + 8 + 1 = 27$$

8重項の1つがバリオン8重項に対応する。残りの8重項と1重項については議論しない。

ここでの議論は，単純化していると考えてほしい。実際にはスピンのことも考慮する必要があるので，もう少し複雑である。10重項はスピン$\frac{3}{2}$をもち，バリオン8重項はスピン$\frac{1}{2}$をもつことに注意してほしい。

自然界では，2つのクォークの束縛状態に対応する状態は見つかっていない。上の図で，点線で色を付けて描かれた真ん中の図に対応する状態である。以前は，なぜだかわからなかった。さらに，各々のクォークには，赤，青，緑の3色があることも知られていなかった。クォークと反クォークの場合には，色のない状態をつくることができる。例えば，π^-は反赤-アップクォークと赤-ダウンクォークの組み合わせで，色のない状態である。しかし，クォーク2個で色のない状態をつくることはできない。クォーク3個の場合には，赤，青，緑を組み合わせて，無色の束縛状態をつくることができる。どうして自然界に無色の状態だけ現れるのかは，まだ完全には理解されていないが，信じるに足るアイデアはある。グルーオンどうし，およびグルーオンとクォークの相互作用により，色電荷の閉じ込めが起きると考えられている。

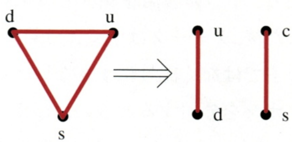
この節を終わるにあたり，1つの裏話を紹介しておいてもよいだろう。ゲルマンがクォーク説を唱えた後，クォークはすぐには見つからなかった。そこで，彼はクォークは実在の粒子ではなく記号にすぎないといって逃げるようになった。つまり中間子やバリオンを分類するときの，添え字にすぎないというわけだ。70年代初頭にセルンで会ったときも，彼はそれに近いことをいった。そこで私は急に立ち上がり，床が揺れるほどにドスドスと彼のほうに近づき，次のように聞いた。「私が添え字の山のように見えますか？」。彼は明らかに取り

乱していた。そしてそれ以後，そういう見解は口にしなくなった。少なくとも私が知るかぎりでは。

8.9　3 重項と 2 重項，レプトン-クォーク対称性

この節では，物理では何がやさしく何が難しいかについて，例をあげながら説明しよう。理論やアイデアを拡張するのは，一般的にはやさしい。だれかがまったく新しいアイデアを出すと，見事なものからみすぼらしいものまで，追随する論文がたくさん出てくるのはよくあることだ。その多くは，見てくれはオリジナルの論文よりも，はるかに明快で立派に書かれている。言い換えると，どの論文が重要なものだったかということは，必ずしも見てすぐにわかるものではない。奇妙な，ほかとまるで異なるアイデア，これを考え出すのが一番難しいのである。いったん提唱されてしまえば，誰もが「もちろん」というだろう。次の例が一番適切だとは思わないが，重要な点を示している。1970 年頃，ほとんどの素粒子物理学者は，レッジェ軌跡や SU3 の枠組みのなかでものを考えていた。SU3 というのは，これまで説明したような 8 重項や 10 重項の考え方のことで，たくさんの新粒子をたった 3 個の基本粒子の束縛状態として理解することができる。レッジェ軌跡についても少しふれたが，私の意見では重要性が薄れた見解なので，これ以上は議論しない。一時は魅力的なアイデアだったが，うまくいかなかった例だろう。

流れが大きく変わったのだ。3 個のクォークを構成要素と考えること，つまり三角形で考えることから，第 2 章で述べたようなファミリー型の構造を考えるようになったのである。次の図は，その変化を示している。元は三角形だったものが 4 番目のクォークを加えることで 2 本の直線になった[g]。



[g] トップとボトムクォークが入った 3 本目の線は，後になって加わった。

この種の考え方の変化を受け入れるのは簡単ではない。あれほど隆盛をきわめた3クォークモデルならなおさらだ。3クォークモデルがうまくいった理由はなんだったのだろう。今では，グルーオンの理論を使うとすべてのクォークが平等になること，そしてクォークのわずかな質量の差を別にすれば，できる束縛状態の質量にもたいした差は生じないからだということがわかっている。しかしながら，弱い相互作用まで考えに入れて広い視野で見ると，この考え方では通用しない部分があることがわかる。3クォークの対称性は，昔は自然界の基本法則だと考えられていた。しかし，広い見地から見なおすと単なる偶然にすぎなかった。チャームクォークがもっと軽かったなら，3クォークモデルは4クォークモデルになっていただろう。トップやボトムクォークの質量が数百 MeV 程度だったら，6クォークモデルになっていたに違いない。そのときは，どんな粒子動物園になっていたかと思うとぞっとする。

三角形から2本の直線への考え方の変化は，歴史的には，実際に起こったわけではない。実際の発展過程は，そんなに簡単なものではなかった。新しい考え方に切り替わった時期を断定するのは難しい。しかし，現実にこの種の変化が起こったのだ。この例は非常に適切だと思う。

もうひとつおもしろいことにふれておこう。ゲルマンが，ここで紹介した三角形に基づく3クォークモデルを提唱したとき，この考え方とはちょっと違ったことも述べているのだ。彼が言及したのは，レプトンとクォークの対称性だった†。しかし，レプトンは電子と電子ニュートリノやミューオンとミューオンニュートリノのように2重項になっており，クォークは3重項を組んでいるので，彼が何を意味していたのかははっきりしない。だが，ゲルマンのいるカリフォルニア工科大学で研究していた日本の物理学者，原康夫は4番目のクォークを導入した††。さらに，クォーク2重項が2つあるという描像をほぼつくりあげた。ある時点まで，彼が新しい描像を構築していたことは確かである。だが並外れた記憶力をもつゲルマンは，原のことをあまり覚えていない。交流が少なかったのだろう。それにもかかわらず，原はゲルマンの論文を読んでひら

---

† (訳者注) 1959年にガンバ–マルシャック–大久保がレプトンとバリオンの対称性を提唱している。

†† (訳者注) 日本でも，クォークとレプトンの対称性に基づいて，牧二郎が4番目の基本粒子を導入した。

めいたに違いない。一方グラショーは，原の論文に気づいていた。そして第4のクォークは，グラショーとブジョルケンによりチャームと命名された。グラショーが後に，イリオプロス(Iliopoulos)，マイアニ(Maiani)とともに行った標準モデルに関する研究では，チャームクォークが重要な役割を果たすことになる。そしてようやく，全体的な描像が明らかになった。

9 素粒子理論

9.1 序　　論

1948年，量子力学は新しい段階に突入した。次々と出てくる高精度な実験結果には，新しい計算法が必要だった。もはや，旧来の計算法によって理論的困難が克服できるとは考えられなかった。驚くほど計算を簡単にする新しい方法を編み出したのが，リチャード・ファインマンだった。彼の方法の真髄は，ファインマン・ダイヤグラムという簡単な図形だ。状況に合わせたいくつかのダイヤグラムさえ描けば，対応する数式を簡単に書き下すことができる。直観的にわかりやすいこともあって，ファインマン・ダイヤグラムは素粒子物理学における標準的な方法となった。

歴史的にも，ファインマンの仕事は画期的な一歩だった。理論に本質的な変更を加えるものではないけれど，ファインマン・ダイヤグラムは非常に実用的だ。おかげで計算が簡単になった。そして，まず解明されたのが，光子と電子の理論である量子電磁気学（QED）だった。量子電磁気学の難点を，くりこみとよばれる手法を用いて解決したのだ。本章では，この点について説明しよう。ファインマンの計算法によって，くりこみの手続きはとてもわかりやすいものになった。

光子–電子間の相互作用以外にも，相互作用には数種類ある。代表的なのが，弱い相互作用である。弱い相互作用の理解には何十年もかかった。くりこみ手法だけでは，すべての問題を解決することができなかったのである。新しい力と新しい粒子，そして，それらの間に適切な相互作用を導入することによって，ようやく，弱い相互作用を計算することが可能な理論，すなわち，くりこみが



リチャード・ファインマン(Richard Feynman, 1918–1988)　私見だが，ファインマンのもっとも重要な業績は，ファインマン・ダイヤグラム(ファインマン図形)として知られる図形を導入したこと，および理論的道具である経路積分を開発したことである。まさに賞賛に値する功績である。

ダイヤグラムに関連する理論の一部は，シュテュッケルベルクがヘルベチカ・フィジカ・アクタという入手困難な雑誌に，フランス語で発表している。陽電子は時間を逆行する電子である(これはクロッシングの考え方だ)という考えも，その論文に書いてある。ファインマンがシュテュッケルベルクの研究を知っていた可能性は低い。だが，その論文の存在を知ったとき，ファインマンは礼儀正しく，自分の論文でシュテュッケルベルクへの感謝の意を表した。実話かどうか定かではないが，この点についてはいくつかの逸話がある。

ある日の夕暮れ(1965 年)，ノーベル賞受賞を祝うパーティの最中，ファインマンの下に１通の電報が届いた。見ると，「私のノートを送り返してください」という文章に，シュテュッケルベルクの署名が添えられている。私のもっている情報(ルース・ウェンガーによるシュテュッケルベルクの未出版の伝記)によると，この冗談を考えついたのはゲルマンらしい。だが，その電報を打ったかどうかという私の問いを，おもしろい考えだといいつつもゲルマンは否定した。

ストックホルムでの授賞式後，セルンでの記念講演を終えたファインマンは，シュテュッケルベルクに紹介された。「なぜダイヤグラムを描かなかったのですか？」というファインマンの質問に，「製図技師がいなかったからです」とシュテュッケルベルクは答えた。常に紳士であり男爵としての地位をいつも意識していた彼は，このように単純な図形を自分で描くことは自分の威信に関わる，と考えたに違いない。

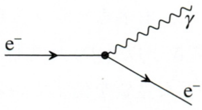
ファインマンは話し相手として魅力溢れる人物で，天性の教育者だった。彼の書いた物理学の教科書は有名である。チャレンジャーの事故調査の際に彼が果たした役割についてもよく知られている。

できる理論にすることができた。有名なヒッグス粒子も，そういった新しい粒子のひとつである。(ヒッグス粒子以外の)仮説上の素粒子が実際に発見され，さらに，それらの素粒子が必要な性質を備えていることが実証されるようになると，当初は数学的な遊びにすぎなかったヒッグス粒子も，現実の理論として認められるようになってきた。1979 年のグラショー，サラム，ワインバーグ，1999 年のトホーフトとヴェルトマンへのノーベル賞は，これらの研究に対して贈られたものである。実際のモデルをつくりあげたのが，グラショー，サラム，ワインバーグであり，トホーフトとヴェルトマンは数学的構造を明らかにし，モデルが実際にくりこみ可能であることを示した。モデルという言葉は，素粒子と，それらの間の相互作用に関する詳細なリストを意味している。ファインマン法によって単純化することができなければ，このような進歩は望めなかった。実験物理学だけではない。理論物理学においても，技術面における進歩には，常に新しい発展と洞察とが伴うのだ。

9.2　ファインマン規則

現代の素粒子理論における主要な道具がファインマン規則である。このダイヤグラムを描くための規則には，量子力学の基礎概念が組み込まれている。図形として描くので,直観的にもわかりやすい。この図形の意味を把握するために,理解しておいてほしい基本概念をあげていこう。

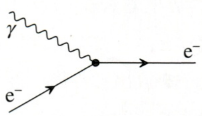
ファインマン・ダイヤグラムでは，粒子を線で表す。それらの線が交差した点が，粒子間の相互作用に対応している。そのような相互作用が起こる点を，バーテックス(頂点)とよぶ。一番わかりやすい例は，電子と光子の相互作用である。文字どおり，いつも目にしていると言っても過言ではないのが，この相互作用,つまり電子からの光の放出である。次の図を見ればわかるとおり,ファインマン・ダイヤグラムを使うと，とても簡潔にこの相互作用が表せる。矢印付きの線で示した電子は，光子を放出した後，再び走っていく。矢印は運動の方向ではなく，(負の)電荷の流れる向きを示している。実は本章の後半では，矢印の意味が若干変わることになるのだけれど，現時点ではこの理解で十分である。



電子と光の相互作用は，ずいぶん前から十分に理解されている。このダイヤグラム（図形）に対応する物理現象も，精密かつ定量的に理解されている。この単純なダイヤグラムが，いろいろな現象に対応することは知っておいてほしい。現象間で異なる点は，始めと終わりの状態だけだ。量子力学ではよくあることだが，始状態と終状態を指定すれば，その過程が起きる確率を理論的に計算することができる。

だからダイヤグラムを描くときには，始状態と終状態を正確に指定しなければならない。大抵の場合，始状態は加速器からやってくる粒子だし，終状態で出ていく粒子は検出器で検出される。つまり，飛んできて衝突する粒子か，もしくは衝突によって生まれた自由粒子である。だが，次のような場合もある。原子[a]の中で，エネルギーの高い軌道を回る始状態の電子が，低いエネルギーの軌道に落ち込み，そのときに光子を放出するのだ。別の例として，送信機からのラジオ波の放出もある。アンテナ内を行ったり来たりする電子が光子を振り落とす。どちらの場合にも，生じる光子は自由粒子だが，電子のほうは，なんらかの形で捕らわれている。

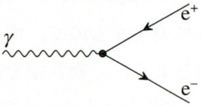
このダイヤグラムからわかる重要な点は，粒子が相互作用によってつくられるということだ。始めは存在しなかった光子が，しばらくすると，存在するようになる。逆の場合もある。光子が眼球に入ると，光子を電子が吸収して，電気的信号となって神経を興奮させるのだ。その過程を図示したのが下のダイヤグラムである。



[a] 原子中の電子は，原子や電子との衝突，あるいは光の吸収によって，高い軌道に移ることができる。

前のダイヤグラムとの違いは，光子が出ていくのではなく，入ってくることだ。光子の線を交差(クロッシング)させることによって，出ていく線を入ってくる線に変えた。クロッシングは，ファインマン・ダイヤグラムの重要な性質のひとつである。入ってくる線を出ていく線に変えたり，その逆の入れ替えを行うと，できあがったダイヤグラムは，別の可能な反応に対応する。この点を利用して，特に光子線以外のクロッシング，例えば電子線のクロッシングなどを考えるとおもしろい可能性が出てくる。先ほどのダイヤグラムを用いて，入ってくる電子線をクロッシングしてみよう。

電子線をクロッシングして得られた下のダイヤグラムでは，光子が電子対に変わる。矢印を見ると，電子対の片方は，(負の)電荷が逆向きに移動している。我々には，正の電荷が出ていくように見える。この場合の規則はこうだ。ある粒子が出ていく場合に，矢印が内側を向いていれば，逆符号の電荷をもっている，と解釈する。したがって，この粒子は電荷が正で，ほかは電子とまったく同じ性質をもつので，電子の反粒子，陽電子とよばれる。ここでクロッシングの規則より精確になる。つまり，線のクロッシングは粒子を反粒子に変える(あるいは逆)。



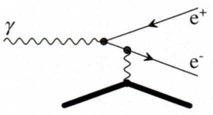
陽電子が実験的に確認されたのは1930年代である。今日の素粒子物理学では，反粒子の存在はあたりまえのこととして受け入れられている。場合によっては，粒子と反粒子が同じ粒子のこともある。光子がよい例だ。そのような粒子を表す線には矢羽をつけない。また，そのような粒子は電荷をもたない。

もう一点，とても重要なことを理解しておいてほしい。相互作用の過程では，エネルギーと運動量が厳密に保存されるということである。原子中の電子は，低エネルギー状態に落ちるときに，光子を放出する。だが自由電子は光子を放出しない。静止状態の電子はどうだろうか。運動量は0なので，最低のエネルギー状態にいることになる。電子が，有限なエネルギーをもつ光子を放出するためには，もっとエネルギーの低い状態に移らなければならない。だが，すでに最低エネルギー状態にいるのだから不可能である。運動している自由電子も，

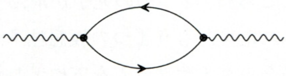
同じことである。電子と同じ速度で走る人から見れば，電子は静止している。ある反応が起きるかどうかについて，観測する座標系の影響は受けない。つまり，観測者が走っているかどうかには関係ない。だから，ある反応が，ある観察者にとって不可能だとすれば，ほかの観察者にとっても不可能に違いない。

同じように，どれほど高エネルギー状態であっても，飛んでいる最中の光子がひとりでに電子-陽電子対に変化することはない。同じ方向に運動している観察者から見れば，高エネルギーの光子も低エネルギーに見えることを思い出せば，理解しやすいだろう。光子は常に光速で走るので，質量をもつ粒子の場合とは違って，決して追いつくことはできない。光子の前方を走る人から見ると，光子は確かに光速で追いかけてくる。だが，エネルギーが小さくなっているので，このときの光子は赤く見える。光子と同じ方向に観察者が十分速く走れば，光子のもつエネルギーは，電子対形成に必要なエネルギー(静止している電子対のエネルギーは，静止した電子の質量エネルギーの2倍)よりも低くなる。

ほかの物体が，運動量やエネルギーを吸収または追加するような場合には，光子が電子-陽電子対に変わることも可能だ。高エネルギーの光子は，原子核に衝突しただけで，簡単に電子-陽電子対に変わってしまう。光子と同じ方向へ運動している観察者には，光子は低エネルギーに見える。その人にとっては，原子核が反対方向に走ってきて衝突するので，電子対形成に十分なだけのエネルギーがあることになる。同じように，物質中を通り抜ける電子や陽電子も光子を放出する。制動放射(ブレムズシュトラールンク)とよばれる現象だ。荷電粒子が減速されるときの加速度によって光が生じるので，このように名づけられた。第7章では，ニュートリノ・イベントの泡箱写真が出てきた。あの写真には，まるでカモメのような電子-陽電子対がいくつか写っている。電子や陽電子の制動放射によってつくられる光子が原因だ。このような過程では，下の図に示したように，もうひとつ別の光子が関係している。電子や陽電子から，あるいは原子核からの運動量やエネルギーを運んでいる光子だ。太い線は原子核を示している。



次に，量子力学に関する重要な点にふれておこう。粒子のエネルギーは，わずかな時間なら許されない値をとることができる。エネルギーの値が，許される値から外れれば外れるほど，その状態にとどまる時間は短くなる。許されるエネルギーの値というのは，一定の質量の粒子が，ある運動量で走るときにもつエネルギーのことだ。例えば静止状態の電子の場合，許されるエネルギーは，質量に光速の2乗を掛けた値($E=mc^2$)だ。だから，エネルギーが0の電子は存在しない。にもかかわらず，量子力学では，0や負のエネルギーをもつ電子や，許されないほど大きなエネルギーをもつ電子(例えば，静止状態にある高エネルギー電子など)なども，ほんの一瞬ではあれば，存在することが許されている。上の議論と関係するが，飛んでいる光子もほんの一瞬なら，電子-陽電子対に変わることができる。ただし，すぐに光子に戻ってしまう。この可能性を示したのが下図だ。

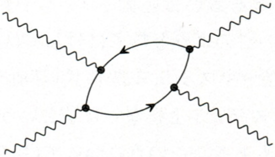


許されないエネルギー(あるいは運動量)をもつ粒子は，**仮想粒子**(virtual particle)とよばれている。このような粒子に対しては，自由粒子のエネルギーと運動量に対して成り立つマスシェル関係式(運動量0の粒子の場合は$E=mc^2$)が成り立たない。マスシェル上にない粒子という意味で，オフ・マスシェルの粒子とよばれる場合もある。この点については，マスシェルの概念について詳細に述べた第4章を思い出してほしい。オフ・マスシェルの粒子，すなわち仮想粒子は，ダイヤグラムの内部に現れる†。直観的に想像できる部分もあるけれど，やはり現実の粒子と同等に扱わないように注意してほしい。オフ・マスシェルの粒子は，ダイヤグラムに対応する計算の途中で，中間的な粒子として登場するが，直接観察することは決してできない。2枚スリット実験における光子と同じようなものだ。つまり光源からスクリーンへ向かう光子が，どちらのスリットを通過したかという問題は，決して答えられない無意味な質問である。我々には，これらの光子が実際にどちらかのスリットを通過したかど

† (訳者注)ダイヤグラムの端に付いている粒子は，始状態もしくは終状態において実際に観測される粒子，つまりマスシェル上の粒子だが，仮想粒子はダイヤグラムの内部にだけ現れる。

うかさえわからない。これが量子力学の哲学だ。このような考え方に慣れておいたほうがいい。波の理論を使ってスクリーン上に現れる干渉縞が計算できるように，ダイヤグラムを描いて計算をすることはできる。だが，くれぐれも仮想粒子を実在の粒子として扱わないようにしないといけない。このような制限を理解した上で，仮想粒子を粒子の一種と考えると都合がよい。仮想粒子という考え方を，計算する際の補助としてとらえておいてほしい。計算したい反応についての直観的理解も深まるので，本書でも仮想粒子という考え方を用いて話を進めていく。

以上のことを頭に入れた上で仮想粒子という言葉を使うと，光子はほんの短い時間，仮想的な電子–陽電子対になることができる。光子がこの状態にあるときに別の光子がやってくると，おもしろいことが起きる。ダイヤグラムの段階で，新しい可能性が浮かび上がってくる。1 つめの光子が電子–陽電子の仮想粒子対になっているところに，2 つめの光子が飛んできて，その光子がどちらかの仮想粒子に吸収された後，もう 1 つの仮想粒子から再び光子が放出される可能性もある。その場合のダイヤグラムを下に示した。



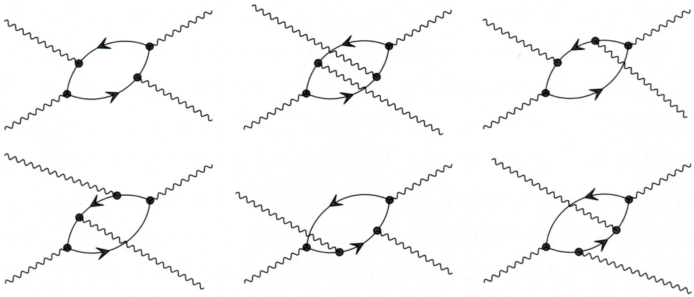
光子と電子の相互作用の強さと，量子力学的な粒子の振る舞いとが正確にわかっているので，この反応が起きる確率を計算することができる。光による光の散乱として，実験的に観測することもできる。仮想粒子と相互作用した結果といってもよいかもしれない。効果自体が非常に小さいため，2 本の懐中電灯の光線を交差させたくらいでは何も起きないけれど，実際の実験でも観測されている。マクスウェルの古典的な放射理論では，光子と光子の散乱は起こらない。この効果は，純粋に量子力学的な効果である。

量子力学を知る人には有名な，いわゆるトンネル効果と似ているかもしれない。量子力学では，障壁があるとき，越えるために必要な量のエネルギーをもたない粒子でも，障壁を通過することがある。また，山の頂上まで上るエネルギーをもたない電子が，ちょうどトンネルをくぐり抜けるように，山を通過す

ることがある。通り抜けるトンネルが長すぎてはいけない。このような現象が起こる確率は，エネルギー不足の領域が長ければ長いほど，すぐに減衰してしまう。ここで，例の疑問が再登場する。トンネルの片側にあった電子が，最終的には反対側にあるならば，「山を乗り越えてきた」と考えるほうが自然ではないだろうか？　だが，繰り返しになるが，このような問題は量子力学の範囲を超えている。電子が山を登ったかどうかを証明する方法はないからだ。そこにある電子は仮想電子であり，電子の場所を特定しようとした瞬間に，こういった効果そのものが消失してしまう（光子がどちらのスリットを通過したか特定しようとする場合と同じだ）。電子が山を越えてきたと直観的に思うなら，そのように考えてほかの電子を反対側から発射したり，山の頂上で電子どうしが影響し合う，といった実験を考案することはできる。ある意味では，仮想粒子どうしも相互作用する。だが，観測できるのは常に始状態か終状態であって，中間の仮想粒子自体は決して観測できない。

もうひとつ別の効果，干渉についても議論しておこう。光は自分自身と干渉する。粒子も同じ性質をもつ。ある始状態から終状態への道筋が1通りではなく，いくつかある場合に生じる現象だ。それぞれの道筋からの影響が，お互いに，強め合ったり弱め合ったりすることで干渉が起きるのだ。この点が，素粒子がビリヤードや大砲の弾と異なるところである。実際には，量子力学の法則はマクロな物体にも同じように当てはまる。ただしその場合，普通にはトンネル効果や干渉効果などの量子力学的効果は，小さすぎて観測できない。機関銃から，小さな弾丸が2つのスリットに向けて発射されている様子を想像してみよう。スクリーン上にできる干渉縞の間隔は，信じられないほど小さい。真ん中にできるピークと隣のピークの距離は 10^{-37} m ほどしかない。原子核の大きさと比べても小さすぎる！

素粒子に関する計算をするとき，理論家はまず始状態と終状態が同じファインマン・ダイヤグラムを可能な限り描き出してみる。次にダイヤグラムに対応する数式を書き下し，加え合わせていく。いろいろな可能性を加え合わせるため，強め合ったり弱め合ったりして干渉が起きる。それらの和を2乗すれば，この反応が起きる確率を計算することができる。例えば，光による光の散乱を計算するときには，6個のファインマン・ダイヤグラムを考えて，それぞれの効果，つまり寄与を組み合わせていく。可能なダイヤグラムをすべてあげてお



こう。

これらのダイヤグラムの寄与の符号が一致するわけではなく，足し合わせると干渉する。それぞれのダイヤグラムの寄与を加え合わせて2乗したものが，確率だ。光子–光子散乱が起きたときに，途中でどのファインマン・ダイヤグラムの反応が実際に起きたのかを知ろうとしても，決してわからない。しつこいようだが，この手の質問は光子がどちらのスリットを通り抜けたかと聞くのと同じ類（たぐい）の質問なのだ。

9.3 無限大

ファインマン・ダイヤグラムの厄介な点は，見ただけではわからない。可能なダイヤグラムをすべて加え合わせるだけでなく，すべての仮想粒子のエネルギーと運動量についても足しあげなければならない。一時的に，光子が電子–陽電子対に変化する例をもう一度取り上げよう。仮想電子と仮想陽電子は，負の値も含めていろいろなエネルギーをもつことができる。とりうるエネルギーの範囲は，無限に広い。電子のエネルギーがとても大きかったり，陽電子が負の大きなエネルギーをもつような場合もある。そのような仮想粒子のエネルギーは，マスシェルから大きく外れている。もちろん，エネルギーの総量は光子のエネルギーと等しい。エネルギー保存則は自然界における大鉄則だ。

どのような過程について計算するときでも，すべての可能な状態を加え合わせなければいけない。マスシェルからどんなに外れていても，すべての仮想粒子の状態を考慮に入れなければならないということだ。だから，時として，と



ウィリス・ラム(Willis Lamb, 1913)　数々の卓越した実験の末に，水素原子のスペクトルと，量子論の理論的予言とのずれを発見したのがラムである。現在ではラムシフトとよばれているこのズレは，1947 年 6 月，ロングアイランド近郊のシェルター島における会議で発表された。オランダのライデン大学でローレンツの後を継いだクラマースは，このような効果が存在する可能性を理解していたので，ラムの洞察についての講演を行った。参加者達は，このズレが場の量子論の高次効果であることを認めた。それまでは，この効果を計算しようとすると生ずる無限大という問題をどう扱えばよいのかがわからず，考慮に入れていなかったのだ。講演において，クラマースはくりこみという考えにもふれている。この考え方の古典的な例は，水中を動くボールだ。ボールに触れる薄い水の層はボールに付着し，ボールの動きとともに運動する。この水の層のおかげでボールの質量は増加する。同じように，おそらく電子の質量の一部は，電子の周りの電磁場がもつエネルギーからきている。クラマースは，裸の質量(電磁場の衣をまとう前の電子の質量)と，実験的に測られた物理的質量とを，はっきりと分けて考えるべきだと主張した。裸の質量そのものを観察することはできない。したがって，電磁場のエネルギーを加えると，ちょうど，測定された質量になるように選ぶことになる。残念ながら，電磁場のエネルギーを計算すると無限大になってしまう。しかし，裸の質量として，この無限大の符号を変えた量(それに有限の量を加えてもよい)に選ぶことにすれば，正しい実験値が再現できる。理論家はこれに似たことを行っている。つまり，無限大を隠し，こっそりと見つからないところに持ち出してしまうのだ。なんとも見苦しいやり方ではあるが，シェルター島の会議に出席した理論家達(ファインマンも含めて)は，クラマースの提案に従って実際に計算を行い，ラムの実験結果と一致することを示した。

てもややこしい計算が必要になる。その上，加え合わせた計算結果が無限大になってしまうこともある。このとき問題となるのが，高エネルギーの仮想粒子からの寄与の大きさだ。高エネルギーの電子-陽電子対(負の大きなエネルギーをもつ粒子と正の大きなエネルギーをもつ粒子)が，低エネルギーの電子-陽電子対と同じように寄与するなら，無限に高いエネルギーの配位が際限なくどこまでも効いてくる。だから，マスシェルから遠く外れた仮想粒子が，マスシェルの粒子と比べて，どの程度寄与するかという点が重要な問題になる。次のように考えよう。粒子がマスシェルから離れるにしたがって，その寄与は減衰し，小さくなっていく。ここでとりわけ重要なのが減衰率だ。減衰が起こらない場合，あるいは減衰率があまりにも小さい場合には，問題が生じる。**これが，場の量子論における発散の問題である。**

音を例に考えてみよう。人ごみの中，周りの会話が聞こえてくる状態を想像してほしい。声の大きさは，距離が遠くなればなるほど小さくなる。だから，ある程度離れている人々の会話は，それほど邪魔にはならない。つまり音波には，離れると減衰する仕組みがある。音が遠く離れても減衰しなければ，遠くの会話も間近の会話も同じように聞こえてくるはずだ。恐ろしい話だ。北京にいる中国人どうしの会話も，モスクワのロシア人達の会話も，すぐそばの議論と同じように聞こえてしまう。発狂しても不思議ではない。耐えがたい騒音だろう。

実際，人でいっぱいの部屋の中では，音は距離に依存して小さくなる。だが，あなたから一定の距離離れた円周上には距離に比例した人数が存在するのだから，逆の効果もある。この効果によって距離による減衰効果が抑制されてしまう。つまり，人で溢れかえった広い部屋は，全体として大変騒がしくなる。会話するにも，怒鳴らなければならないほどだ。ということは部屋が無限に広ければ，あなたは耳が聞こえないも同然である。

無限大が生じる要因は，いくつかある。まず，粒子がマスシェルから離れれば離れるほど，その粒子がその状態にとどまる時間は短くなることから説明しよう。だから通常，仮想粒子が現れる場合には，付随する減衰因子が存在する。仮想粒子は，仮想的であればあるほど(マスシェルから離れるほど)，大きく減衰する。さらに，減衰の仕方は，その粒子固有の性質(後で詳述する)によって変化する。頂点(バーテックス)の振る舞いも，要因のひとつである。こちらは，

結合定数や関与する粒子のエネルギーにも依存する。大抵，それらの結合定数が，エネルギーに強く依存することはない。もちろん，例外はあるけれど。

厄介なのは，仮想粒子の振る舞いが，その固有の性質によって変わることである。このとき重要なのが，粒子のスピンである。量子物理学における驚くべき発見のひとつは，粒子がスピンをもつということだった。あたかも軸の周りを自転しているかのように，粒子には固有の角運動量がある。ある程度の大きさ，例えばビリヤード球程度の大きさをもつ物体なら想像しやすいかもしれない。大きさをもたない素粒子については想像しづらいかもしれないが，事実である。すべての素粒子は，固有の各運動量として，決まった大きさのスピンをもつ(0の場合もある)。新しい粒子がつくられたり消えたりするとき，その相互作用は必ず角運動量を保存する。スピンをもつ粒子が入ってきて相互作用する場合も，角運動量は常に保存される。終状態の全角運動量は，粒子のスピン，スピンをもたない粒子の回転運動，あるいはその両方の組み合わせからなっている。複雑ではあるが，前提となる基礎知識は意外と少ない。スピンは，ある基本単位を用いて測る。常に，その基本単位の$\frac{1}{2}$の整数倍だ。

実は，今日までの間，スピンが0の素粒子は発見されていない。存在が強く期待されているヒッグス粒子のスピンは0である。大抵の粒子のスピンは$\frac{1}{2}$，残りの多くは1である。ただし重力子(電磁場における光子と同じく，重力相互作用を媒介する粒子)のスピンは2である。仮想粒子には，これまでの議論に関連する重要な性質がある。スピンが大きくなると，仮想粒子の寄与は高エネルギーにおいても減衰しなくなるのだ。スピン1の仮想粒子の寄与も，高エネルギーではほとんど減衰しない。スピン2の仮想粒子の場合はさらにややこしい。重力の量子論は，ほとんど形をなさなくなる。光子以外のスピン1の粒子に関する場の量子論は，1971年までは正しく理解されていなかった。仮想粒子の寄与をどう扱えばいいか，わかる人は誰もいなかった。無限大という問題が常に付きまとっていたせいである。

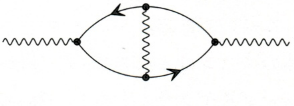
光子の場合，光子自体のスピンは1なので，寄与はほとんど減衰しない。だが，異なるファインマン・ダイヤグラムどうしが互いに打ち消し合うので，結果的には減衰が起こる。だからこそ，光子と相互作用する電子の理論は，今から述べるくりこみ手法を使って，なんとか取り扱うことができたのだ。1948年，ファインマン，朝永，そしてシュウィンガーは，後の1965年にノーベル賞を

受賞する理論を正しく導き出した。だが，ほかのスピン1の粒子を含む弱い相互作用に関しては，手のつけようがなかった。

弱い相互作用を取り巻く状況が一変するのは，各々のファインマン・ダイヤグラムにおけるもっとも厄介な効果が，すべてのダイヤグラムを足し合わせると，互いに打ち消し合うことがわかったときである。そのためには，新しい粒子と新しい相互作用を（したがって新しいダイヤグラムを）導入する必要があった。そして，新しい粒子が素粒子論に導入された。この点に関しては，後でもう少し詳しく述べよう。光子に関しては，新しい粒子を導入しなくても，異なるダイヤグラム間で相殺することができる。上述したように，この事実は1948年以降，ある程度予想されていた。量子電磁気学の場合には，くりこみ手法を用いれば，観測量に対し有限の値を予言できるので，実験結果と比べることができた。とりわけ重要だったのは，電子の磁気モーメントだ。スピンをもつ荷電粒子は，通常，磁気モーメント†をもつ。これは，電荷が回転しているためと解釈してもよいかもしれない。現在では，量子電磁気学を用いた磁気モーメントの予言は，驚くべき精度で検証されている。だが，その点について述べる前に，準備として摂動論について説明しておこう。

9.4 摂動論

すでに指摘したとおり，どのような過程を考える場合でも，すべての可能性を足し合わせなければならない。もちろん，仮想粒子のエネルギーや運動量分布も加え合せる必要がある。さらに，仮想粒子が別の仮想粒子を放出して，再吸収する効果も考慮しないといけない。下の図を見てみよう。仮想電子が放出した光子を，仮想陽電子が吸収している（その逆でもよい）。

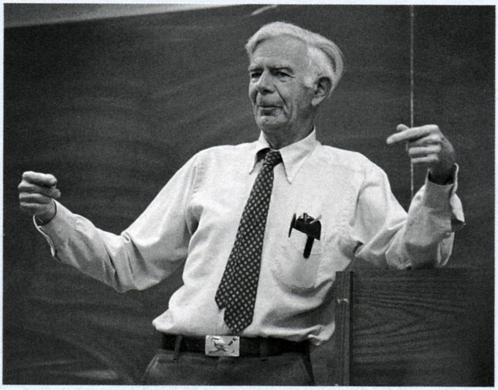


† （訳者注）電子などの粒子は，小さな磁石のような性質をもつ。この磁石の強さを磁気モーメントとよぶ。

量子論を複雑にしている要素を，もうひとつあげておこう。実は，この連鎖には限りがないのだ。交換される光子は1個である必要はない。2個でもいくつでもかまわない。さらに，それが瞬時に電子–陽電子対に変化してもよい，等々。どうすれば，それらすべてのダイヤグラムを計算できるだろう。とても実現できそうもない。

幸いなことに，多くの場合，すべての可能性は考慮しなくてもよい。それぞれのバーテックスには，相互作用の強さを表す結合定数が対応している。結合定数は電荷に等しいので，少なくとも量子電磁力学においては，非常に小さい。電子(あるいは陽電子)からの光子放出・吸収は，電子の電荷に比例する。もし，電子が電荷をもたなければ，電磁場とは相互作用しなかっただろう。したがって，上のように，電子と陽電子が余計な光子を交換しているダイヤグラムでは，余計な光子がないときに比べると，e^2 が余分である。$-e$ は電子の電荷である。そのために，このようなダイヤグラムの寄与は非常に小さくなる。実際には，もっとほかの因子もある。それらを考慮してつくった無次元量 $\alpha=e^2/4\pi\hbar c$ を，物理学者は微細構造定数とよんでいる。この値は，余分の光子を付けたダイヤグラムの大きさを示しており，数字で表すと $\alpha\approx\frac{1}{137}$ だ。したがって，余分な光子交換が入っているダイヤグラムの寄与は，光子交換のないダイヤグラムと比較すると，ほんの1% 程度にすぎない。つまり，ある過程を計算するときに，バーテックスの数が最小のファインマン・ダイヤグラムだけを考慮すれば，だいたい1% の精度で正しい答えが得られるということである。さらにバーテックスを2つ付け足したダイヤグラムを計算すれば，0.01%(10^4 分の1だ)まで精度を高められる。

これが場の理論，**摂動論**である。まったく厳密な解を得ることは不可能に近い。事実上は無理だろう。しかし，必要な精度に近似することは，いくらでもできる。とはいっても，もちろん足し算の迷路から抜け出せるとしての話だ。現実には，たくさんの仮想粒子が関係する図において，すべてのエネルギー・運動量の足し算を行なおうとすると，迷路に入り込んでしまうだろう。実質的にもっとも進んでいるのは，電子の磁気モーメントの計算である。荷電粒子が回転運動をすると磁気モーメントをもつのと同じように，電子にもスピンがあるので，磁気モーメントをもつ。つまり，電子は電荷をもつ上に，小さな磁石としてもはたらく。電子の磁気モーメントと電磁場との相互作用にも，量子補



ホーラス・(ディック)・クレイン(Horace R. (Dick) Crane, 1907)　ミシガン大学教授のクレインは，すばらしい精度で電子の磁気モーメントを測定する方法を開発した。ある単位を用いると，量子補正を行わなければ，磁気モーメント(通常 g で表す)は 2 になる。磁石に向きがあるように，磁気モーメントにも向きがあり，スピンと同じほうを向いている。磁場の中を電子が運動する場合，電子の進行方向を基準にして考えると，g が正確に 2 に等しければ磁気モーメントの向きは変わらない。だが磁気モーメントが 2 からずれると，電子スピンは磁場の周りを回転し始める。この回転角度を測定すれば，磁気モーメントの 2 からのズレが，精密に求められる。このようにして，磁気モーメントが 2 からずれる原因となる純粋な量子補正が測定できる。この方法を g-2 法とよぶ。磁気モーメントの理論計算と様々な実験とを行うために，多数の研究者が長い時間を費やしてきた。

クレインは，とても謙虚で自分の業績を吹聴する人ではない。何事においてもそうなので，彼のすばらしいアイデアがいつも正当に評価されているとはいいがたい。とはいえ，大変に栄誉あるアメリカ国家科学賞(the US presidential medal)を手にしている。退職にともなって，クレインはアナーバーのハンズ・オン博物館(手で触れることのできる体験型博物館)を手伝うことにした(きっかけは，ミシガン大学の理論物理学者ヤオの妻のシンシア・ヤオだ)。 彼は，展示品が正しく作動するように，常に注意を払っていた。この種の気配りの有無が，アナーバー・ハンズ・オン博物館のような体験型博物館存続の鍵となる。クレインの努力は並大抵のものではなかろう。バスいっぱいの生徒をはじめとする来訪者たちは，大体において，慎重さとは程遠い振る舞いをするから。

クレインには蘭を栽培する趣味がある。




リチャード・ガーウィン(Richard Garwin, 1928 年, 左)と**バレンティン・テレグディ**(Valentine Telegdi, 1922 年, 右)。リーとヤンの理論的解析を受けて，パリティ非保存について先駆的な実験的研究を行ったのが，ガーウィンとテレグディだ。それぞれのグループは独自に，パイ中間子崩壊($\pi \to \mu +$ニュートリノ)から生じるミューオンが偏極していることを示した。この事実は，パイ中間子崩壊におけるパリティ非保存を意味している。

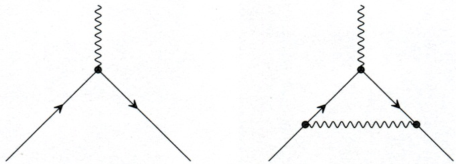
g–2 に関するクレインの提案が出ると，ミューオンの異常磁気モーメントを測定するのに非常によい方法だということを，物理学者達は直ちに理解した。ミューオンの崩壊は，ミューオン自身のスピンの向きに依存している(この事実もパリティ非保存を示唆している)。だから，崩壊から生じる粒子の分布を測定すれば，ミューオンのスピンの向き(と磁気モーメント)が簡単にわかる。高エネルギーではミューオンも長生きするので，それなりの距離を走る。

理論面で必要な理論(量子補正ではない)を初めて定式化したのは，ミシガン大学の理論家ケン・ケース(Ken Case)だ。続いてバーグマン(Bargmann)，ミッシェル(Michel)，テレグディが出した論文は，現在では古典となっている。スピンの扱いに関する標準的論文である。

1959 年に，セルンの実験グループが，ミューオンの g–2 測定に初めて取りかかった。1961 年に発表された実験結果は，誤差 1.9% の範囲で，完全に理論と一致した(Charpak, Farley, Garwin, Muller, Sens, Telegdi, Zichichi)。後に，実験の精度が飛躍的に向上したのは，セルンとブルックヘブンのミューオン蓄積リングのおかげである。

私の長年の友であるテレグディには，本書の執筆にあたり，大変お世話になった。ハンガリーで生まれ，第 2 次世界大戦後に国籍を失った彼は，自分でつくったパスポートで旅していた。

正が加わる。下の図は，α に関する最低次のダイヤグラムと，その次の次数のダイヤグラムを示している。



適切な単位を選べば，量子補正を含まないときの電子の磁気モーメントは 1 になる(別の単位のとり方をする場合もある。例えば，2 にすることもある)。2 次および高次の効果によって，ほんの少しだけだが，磁気モーメントが変化する。精度の目安を示すために，異常磁気モーメントに関する理論値をあげておこう(4 次，6 次，8 次効果も含めておく)。

$$a_e = 0.5\left(\frac{\alpha}{\pi}\right) - 0.328\,478\,965\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1.181\,241\,456\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1.4\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4$$
$$= 0.001\,159\,652\,201$$

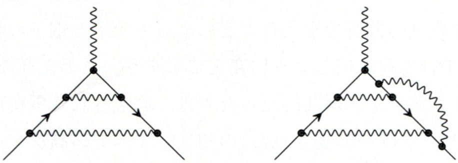
実験値は 0.001 159 652 188 である。$\alpha/\pi \approx 0.00232$ が非常に小さいことに注意してほしい。理論値および実験値の誤差の範囲は，この 2 つの値の差と同じ程度である。つまり，すばらしい精度で一致しているわけである。同様に，ミューオンの異常磁気モーメントも相当正確に計算されている。$a_\mu = 0.001\,165\,918\,49$（ただし最後の 4 桁については，70 程度の幅の中で変化する），一方，最新の実験値は $a_\mu = 0.001\,165\,92030$（不確実さ 160）。理論値と実験値の精密さは驚嘆に値する。α^3 の係数を求めるには 72 個のダイヤグラムを計算する必要があり，20 数年の歳月を要した。α^4 の係数を求めるには，891 個のダイヤグラムを計算しなければならない。主に数値計算だが，スーパーコンピュータでも数年間かかるほど膨大な計算だ。どんな実験でも，1000 分の 1 の精度を達成するのは大変なのに，この実験は 1000 000 分の 1 の精度を達成しているのだから，その困難さは推して知るべきだろう。電子に関する最も劇的な実験は，電磁トラップ† に閉じこめられた 1 個の電子を測定した実験である（1989 年，デーメ

†　(訳者注)電磁場により荷電粒子を閉じこめる装置。

ルトがこの研究でノーベル賞を受賞)。

ミューオンに関しては少し状況が違う。上と同じくらいの精度を求めると，W や Z^0 さらにはクォークさえも入ったダイヤグラムを考慮しなければならない。それはそれで，ますます話がおもしろくなってくる。本書執筆時点におけるミューオンの磁気モーメントに関するもっとも新しい実験は，前に述べたブルックヘブンのミューオン貯蔵リングで行われたものだ。

理論家が，このあたりの事実をどのように捉えているかについて，しばらく述べることにしよう。理論家は，摂動論の次数を分類するために，よくループ[†]の数を用いる。最低次のファインマン・ダイヤグラムは，ツリー・ダイヤグラム(ループなし)とよばれる。次の次数のダイヤグラムの1ループ，その次は2ループ，というように続く。図に示したのは，2ループと3ループのダイヤグラムである。



理論と実験結果は，驚くほどの一致を見せている。複雑な量子効果を考慮すると，このすばらしい一致は，摂動論の妥当性と同様に，理論的洞察の正しさを強力に支持するものだ。多くの理論家は，近似を用いない定式化を好むだろうが，今のところ摂動論以外に方法はない。いくつかの例では，特定の型のダイヤグラムに限れば，すべての次数の寄与を足し合わせることもできる。だが，これまでのところ，一般的な非摂動的な解き方は見つかっていない。人生とはそういうものだ。量子力学的な計算の基礎がわかっているだけでよしとするべきだろう。

私自身の学問人生でも，この驚嘆すべき理論と実験の一致が重要な役割を果たしてきた。ダイヤグラムという方法，そして摂動論がうまくいくという事実には，深い感銘を受けたものである。おかげで，素粒子理論が偽りの神に支配

† (訳者注)ファインマン図の中で，1周して元に戻ってくる線のことをループとよぶ。

されていた暗黒の1960年代中頃でも，これらの方法を使い続けることができた。標準モデルが完成している現在では，至るところで，この方法を使うことができる。

9.5　くりこみ可能性

すでに言及したことだが，仮想粒子のエネルギーと運動量がとりうる値の和が収束しない問題は未解決である。和が収束しないために，結果が無限大になることもある。そのため，この問題に関する研究は停滞しつづけていた。だが，1948年にクラマースが提案したくりこみの考えによって計算が可能になった。主題となる量子電磁力学において，計算結果が無限大になるのは，ある特別の場合だけだということが明らかになったのである。例えば，上述した電子の磁気モーメントを計算しても無限大が生じることはない。しかし，このダイヤグラムは，電子の磁気的性質を変えることによって光子と電子の相互作用を変化させるため，電子の電荷も同じように変えてしまう。このような電荷の補正が，まさに無限大になるのだ。画期的だったのは，測定される電荷は各粒子のもともとの電荷（ツリーグラフで表される）の和に，すべての高次ダイヤグラムの寄与を足し合わせたものだ，という点である。だが，これらの高次ダイヤグラムの寄与[b]を加える前の，もともとの電荷（裸の電荷）の大きさについては，まったくわからない。それなら，全電荷（衣を着た電子の電荷）が測定される実験値と同じ値になるように，裸の電荷を選んでおけばよいのではないだろうか。つまり，高次補正の無限大を打ち消すように，裸の電荷に逆符号で無限大の値をもたせておけば，両者を足し合わせたときに，有限の測定値に一致させることができる！　ずるいけれどもうまくいく！

はじめは，このトリックに抵抗があるかもしれない。だが，非常に有効なやり方だ。重要な点は，高次補正を計算したときに出てくる無限大が，理論に含まれている自由パラメーターにちょうど対応していることだ。自由パラメーターというのは，あらかじめ理論的に予言することができないパラメーターのことである。どのような理論にも，必ず自由パラメーターが含まれている。例

---

b　この種の補正を放射補正（または輻射補正）とよぶ。

えばニュートンの重力理論では，重力の強さを決定する定数である重力定数が自由パラメーターに当たる。つまり，重力の強さは何かひとつ，例えば地球の軌道を正確に求めることによって決めることができる。基本的に，自由パラメーターは実験的に決定される。ニュートンの重力定数の大きさを予言する理論は存在しない。つまり，重力定数は，実験によって決定されるべき自由パラメーターなのだ。

電子の電荷も一種の自由パラメーターである。計算してわかるものではなく，理論をつくるときにあらかじめ必要となる値である。電子の質量も自由パラメーターである。測定しなければわからない，つまり，基本原理から予測することはできない。だからこそ，上述のような操作によって，無限大を隠すことができる。パラメーターの値は実験的に測定できる。だが理論的には，測定値というのはもともとの値に多くのダイヤグラムの寄与を足し合わせたものである。重要な点は，実験で観測するものには，すべてのダイヤグラムの寄与が含まれているということだ。ダイヤグラムの寄与がどのようなものであれ，もともとの値との和だけしか観測できないので，我々が知ることができるのは，組み合わせたものだけということになる。したがって，ダイヤグラムの寄与が無限大なら，もともとの値をやはり無限大で反対符号にしておけば，和を有限にすることができる。この有限の値を，実験的に測定される値と等しいと考えればよい。無意味なものから無意味なものを引いて，意味のあるものを求めるのである。

このようにして無限大を取り除くやり方を，くりこみとよぶ。この手続き自体は，満足できるものとはいいがたい。もともとの電荷や質量が実際に無限大だと考えている人はいないはずだ。むしろ，理論が不完全なために，このようなことが起きると考えられる。しかし，くりこみによって，それらの不完全さを分離してとりあえず隠しておくことができる。量子電磁気学では，奇跡的にすべての無限大を理論に含まれる自由パラメーターにくりこむことができる。自由パラメーターへの無限大の補正を除けば，ほかのもの(例えば電子の磁気モーメントなど)はすべて有限になる。これまでに確認された範囲内では，すべての計算値は実験とよく一致している。

さて，それでは，我々の理論の不完全な点を確認しよう。まず，我々の理論の解法が摂動論に限られているという点である。2つめは，分離して隠すこと

ができるとはいえ，無限大が現れる点である。このように不完全な点があることは確かだが，くりこみの手法を用いれば，実験結果を正確に予測することができるのも事実である。

無限大を自由パラメーターにくりこむことができない理論もある。そのような理論には無限大が残っているため，しっかりとした予言能力はない。このような理論を**くりこみ不可能**とよぶ。光子以外の(スピン 1 の)ベクトル粒子を含む理論は，長い間，そのような理論，つまり予測力がなく役に立たない理論だと思われていた。だが様相は一変した。実は，現在ではスピン 1 の粒子を含むくりこみ可能な理論が存在する。ゲージ理論である[c]。厳密には，ゲージ理論という言葉はくりこみ可能性を指すわけではない。スピン 1 の粒子がくりこみ可能になるために必要な数学的性質をさしている。くりこみができないゲージ理論もある。例えば，(スピン 2 の粒子に関する)重力理論もそのひとつだ。スピン 1 の粒子についてのゲージ理論は，発見者の C. N. ヤンと R. ミルズにちなんで，ヤン-ミルズ理論とよばれている[†]。

実は，実験的に知られている相互作用は，ほとんどすべてがくりこみ可能であり，重力だけが例外となっている。重力の量子効果については，未解決のままである。だから，量子重力理論およびブラックホールなどその帰結については，わからないことが多い。

9.6　弱い相互作用

弱い相互作用は，これまでとは性質の異なる相互作用である。量子電磁力学ほど遠くまでは届かない。光子は質量をもたないので，どんなにエネルギーの小さな光子でも存在しうる。だからこそ，エネルギーが 0 で運動量の小さい仮想光子は，ほんのわずかしかマスシェルから外れていないのである。だからこのような仮想光子を交換しても，あまり減衰が起こらない。電磁相互作用が遠く

---

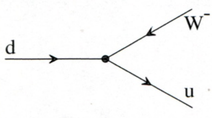
[c] 歴史的にいうと，ゲージという名前は，別の文脈，つまり重力に関連して使われはじめた。当時は，長さのスケールを変えるゲージ変換のことを指していた。今議論している理論においても，同じような変換を考えるが，長さのスケールを変えるものではない。だがいつのまにか，この用語が定着してしまった。

[†] (訳者注)ゲージ理論は日本においても独立に内山龍雄によって発見された。

まで届くのは，この種のエネルギー0で運動量の小さな仮想光子のおかげだ。また，重力が遠くまで届くのは，重力子のおかげである。我々が日常生活において経験する遠距離まで届く力は，これですべてあげたことになる。弱い相互作用は，非常に短い距離だけしか届かない。その点について少し詳しく説明しよう。

弱い相互作用は，1896年，ベクレルによるβ放射能の発見によって，物理学の歴史に登場した。だが，純粋な現象論的レベルにおいてさえ，弱い相互作用が理解されるまでには随分時間がかかった。実験的，理論的な理解はなおさらである。その歴史を辿ることは本書の目的ではないので，弱い相互作用が現在どのように考えられているかということだけを述べよう。

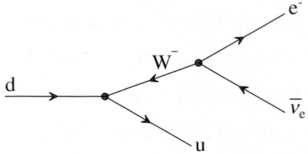
もっとも基本的な原子核のβ崩壊を考えてみよう。β崩壊では，中性子が陽子と電子(と反ニュートリノ)に崩壊する。中性子にはダウンクォーク(dと表す)が2個と，アップクォーク(uと表す)が1個含まれている。同じく，陽子にはdが1個とuが2個含まれている。まず始めに，中性子中のdクォークの1つが，uクォークと負電荷をもつベクトルボソン，W^-とに崩壊する。この崩壊を表すダイヤグラムが下図だ。



この図には，弱い相互作用における基本的なバーテックス(頂点)の1つがかいてある。この相互作用の強さを表す結合定数(「弱い電荷」)は，通常はgと表記されるが，電磁気学におけるものよりも少し大きい。実験によれば，$\alpha_w = g^2/4\pi\hbar c = 1/32$だ。ただし，表記法にも注意してほしい。この反応におけるすべての粒子は電荷をもつ(電子の電荷が-1になる単位を用いると，d，u，W^-の電荷はそれぞれ，$-\frac{1}{3}$，$\frac{2}{3}$，-1)ので，図中の矢印は負の電荷の流れには対応していない。かわりに，粒子と反粒子を区別するために矢印を用いる。エネルギーの流れと反対方向を向いた矢印は反粒子を表す。ここで，選択しなければならないのが，W^-を粒子とするか，反粒子とするかである。今から思えば，過去に誤って電子の電荷を負に定義してしまったのは残念なことである。Wについては，同じ過ちを犯さないように，W^-を反粒子と定義しよう。Wの

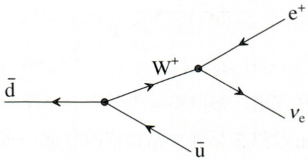
矢印が内側を向いているのは，こういうわけである。

Wは，とても重い(Wの質量 80.3 GeV を陽子の質量 0.938 GeV と比べよ)。dクォークが非常に軽い(約 10 MeV＝0.010 GeV)ことを考慮すると，実際のd崩壊過程におけるWは，まさに仮想的な(マスシェルから遠くはずれた)粒子である。次の段階で，Wは電子と反ニュートリノに転換する。この相互作用は，弱い相互作用のもう１つの基本的なバーテックスだ。次の図はd崩壊の完全なダイヤグラムである。



ニュートリノは中性で電荷をもたないが，反ニュートリノとニュートリノは同一ではないことを思い出してほしい。

前に述べたように，負電荷をもつW^-(これを反粒子と約束した)が存在するということは，反対向きの電荷をもつ粒子W^+が存在するということだ。

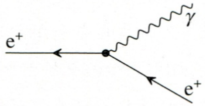


W^+が関与する例としては，反中性子が，反陽子，陽電子(反電子)，そしてニュートリノへと崩壊する反応がある。この反応は，先ほどの説明に出てきた反応において，すべての粒子を反粒子に置き換えたものだ(すべての矢印の向きを変える)。

Wはスピン１なので，高エネルギーでもその寄与は減衰しない。前述のように，その場合の相互作用は一般にくりこみ不可能になる。この点については，後で体系的に述べるつもりだ。どのように状況が改善されるのか，高エネルギーにおける振る舞いをよくするために，なぜ新しい粒子と相互作用を導入する必

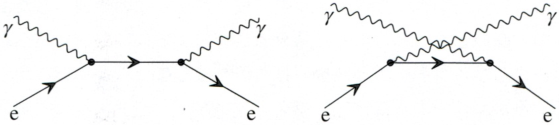
要があるのか，等を明らかにしよう。

ファインマン・ダイヤグラムの別の性質については，すでに説明した。まず，前に出てきたクロッシングの性質を思い出してほしい。入ってくる線を出て行く線に，あるいはその逆の入れ替えを行うと，別の可能な過程が得られる。つまり前の説明の要点は，あるダイヤグラムにおけるすべての矢印を反対向きにしたら別の過程が得られるが，その新しい過程もやはり自然界で起こるということである。この章の一番目のダイヤグラムでは，電子が光子を放出しているが，矢印を反対にすると，下に示すように陽電子が光子を放出する図になる。もう一度強調するが，粒子の動きは矢印とは無関係である。矢印が，粒子の運動(つまりエネルギーの流れ)と反対向きの場合には，反粒子を表しているということだ。



9.7　コンプトン散乱

高エネルギーにおけるダイヤグラムの振る舞いを調べるには，簡単な反応について考えればよい。まず，高エネルギー粒子が散乱される過程のエネルギー依存性を評価する必要がある。一番単純で重要な例がコンプトン散乱，つまり電子による光子の散乱だ。最低次の近似では，電磁相互作用だけを考えればよい。次の図は，最低次の近似で考えなければならない2つのダイヤグラムを示している。



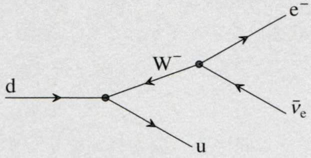
これから述べることは，厳密には光子の質量が0ではないときにだけ成り立つ。しかし，ここでは議論を簡単にするために，その点は無視することにしよう。

大切なのは，理論の振る舞いが粒子のエネルギーに依存することである。ある過程が起こる確率が，入射粒子(この場合は光子)のエネルギーとともに増加することは，理論的には許されない。なぜなら十分に高エネルギーになると，その確率が1を超える可能性があるからである。1を超える確率は無意味なので，物理理論としては受け入れられない。

では，ここにあげたダイヤグラムの一般的性質について説明しておこう。各々のダイヤグラムの寄与は悪い振る舞いをする。どちらか片方のダイヤグラムの寄与だけを考えると，この過程が起こる確率は，光子のもつエネルギーの増加にともなって無限に大きくなってしまう。それでは困る。しかし2つのダイヤグラムを組み合わせれば，光子のエネルギーが大きくなっても確率は有限にとどまるようになる。つまり，これら2つのダイヤグラムの寄与は，高エネルギーではお互いに打ち消し合う。それぞれのダイヤグラムが，互いに相手の悪い振る舞いを打ち消し合うのである。なんとすばらしい性質だろう。まさに，この点こそが量子電磁気学のからくりである。

上の図形やほかの粒子に対する類似のダイヤグラムが，高エネルギーにおいてどのように振る舞うかを推測するために，次の規則を用いる。説明はせずに，規則だけを述べておく。入ってくる，あるいは出ていく光子(スピン1のベクトル粒子)があれば，その寄与はエネルギーEに比例する。仮想光子の寄与は，エネルギーに依存しない定数になる。仮想電子，あるいは，一般的にスピン$\frac{1}{2}$の仮想粒子の寄与は，$1/E$として振る舞う。入ってくる，あるいは出ていく電子(スピン$\frac{1}{2}$粒子)は，$\sqrt{E}$の寄与をする。仮想スカラー粒子(スピン0)の寄与は$1/E^2$として数える。入ってくる，あるいは出ていくスピン0粒子の寄与は定数となる。特殊な場合には，エネルギー依存性が，この規則にしたがって計算したものと食い違うこともある。結合の仕方によっては，上に述べたようなスピンで決まるエネルギー依存性を，打ち消してしまうことがあるからだ。後でも出てくるが，このような例に，ベクトルボソンと結合する粒子が2個とも実粒子(仮想粒子でない粒子)の場合がある。ゲージ理論では，この場合のバー

テックスは，常にスピンの効果を相殺する。つまり，ベクトルボソン(仮想粒子でもよい)と2つの実粒子との結合では，ベクトルボソンのスピン効果を無視してもよい。例えばダウンクォーク崩壊だ。先ほどの図を，もう一度あげてみよう。



図中の仮想 W^- は，両端で実粒子と結合している。この仮想 W のエネルギー依存性はスカラー粒子の場合と同じく $1/E^2$ になる。ではここで，読者に便利なようにこれまでに出てきたさまざまな因子を整理しておこう。表を見てほしい。

スピン	入射／放出	仮想粒子	端*
0	1	$1/E^2$	$1/E^2$
$\dfrac{1}{2}$	$\sqrt{E}$	$1/E$	$1/E$
1	E	1	$1/E^2$

＊ゲージ理論において，両端に実粒子が付いた場合の仮想粒子の振る舞い

くりこみ可能な理論では，ある反応が起こる確率は，エネルギーの関数として減少するか，あるいは定数でなければならない。純粋に直観的に考えても，入射粒子のエネルギーが増加するにつれて，確率がどんどん大きくなるということは受け入れがたい。前にも述べたことだが，ある現象が起こる確率(断面積)は，ダイヤグラムの寄与を2乗すれば求められる†。コンプトン散乱のダイヤグラムに対して，上の規則を用いてその振る舞いを求めると，エネルギーとともに増加する，つまり E^2 (断面積は E^4)に比例するという結論になる。

† (訳者注)ファインマン・ダイヤグラムの和が振幅を与える。振幅の2乗が断面積になる。

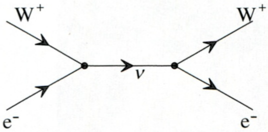
このような結論は，受け入れがたい。2番めのダイヤグラムも，E^2に比例したエネルギー依存性をもつ。こちらのダイヤグラムは反対の符号をもつので，これら2つのダイヤグラムを足し合わせると，エネルギー依存性は緩やかになり定数になる。符号の正負について，簡単に説明しておく。1個めのダイヤグラムに現れる中間状態の(仮想)電子が，大きな正のエネルギーをもつのに対し，2番めのダイヤグラムでは，中間状態の仮想電子が負の大きなエネルギーをもつ。そのために，中間状態の仮想電子からくる$1/E$項の符号は，それぞれの図で反対になる。

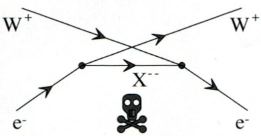
このように，ダイヤグラム間で悪い振る舞いを相殺するのが，ゲージ理論の基本的な考え方だ。もっとも簡単な例は，もちろん量子電磁気学である。各々のダイヤグラムのエネルギー依存性は受け入れがたいが，いくつかのダイヤグラムを一緒にして考えれば，悪い振る舞いはすべて打ち消し合ってしまう。ただし相殺する仕組みは単純ではない。何よりも，時と場合に応じて新しい粒子を導入しなければならない。さらに，導入した仮説上の新しい粒子が必要な性質をもっていることを，実験的に確かめる必要がある。では荷電ベクトルボソンを含む弱い相互作用に関して，この考え方が成り立つかどうかを見てみよう。

9.8 中性ベクトルボソン

しばらくの間，電磁相互作用は考慮しないでおこう。つまり，以下では仮想光子を含むダイヤグラムは考えない。電磁相互作用は，これからの議論においては本質的ではないからだ。まず，電子によるW^+の散乱について考えよう。この過程に対応する最低次のダイヤグラムは，次の図の1番めの図形である。この過程を媒介しているのは仮想ニュートリノだ。高エネルギーにおけるこの図の振る舞いはひどく悪い。

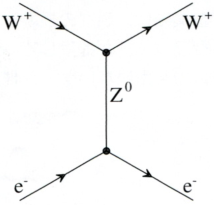
表の規則にしたがって，高エネルギーにおける振る舞いを推測するとE^2に比例する(WにはE，電子には$\sqrt{E}$，中間状態のニュートリノには$1/E$が対応する)。Wが結合している粒子のうち，一方のニュートリノは仮想粒子なので，バーテックスにおける相殺は起こらない。





コンプトン散乱の場合のように，上の図の2番めのダイヤグラムがあれば，お互いに打ち消し合って，問題は解決すると思うかもしれない。入射電子から出てくる W は正の電荷をもつが，電荷は保存されるので，中間状態に現れる粒子の電荷は -2 でなければいけない。したがって，図に現れる中間状態の粒子 (X^{--}) はニュートリノではありえない。しかし，今までのところ，このような粒子は知られていないので，このダイヤグラムは存在しない。だから，どくろマークを描いておいた。では，どうすればいいだろう？　ベクトルボソンをもうひとつ持ち込めばよい。ただし，今度のベクトルボソンには電荷がない。この中性のベクトルボソンが，電荷をもつベクトルボソンと電子に結合すると仮定しよう。そうすれば3種類目の新しいダイヤグラムが描ける。この新しい中性のベクトルボソンは，荷電ベクトルボソンと電子に結合する。このときの結合の強さを，新しいダイヤグラムの高エネルギーにおける振る舞いによって，1番めのダイヤグラムの悪い振る舞いを相殺するように定めればよい。

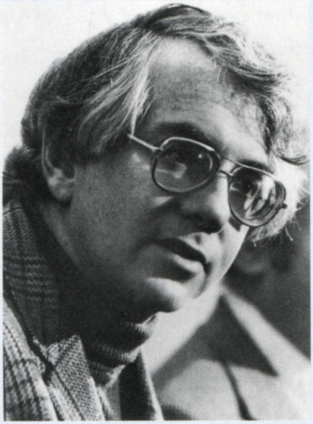
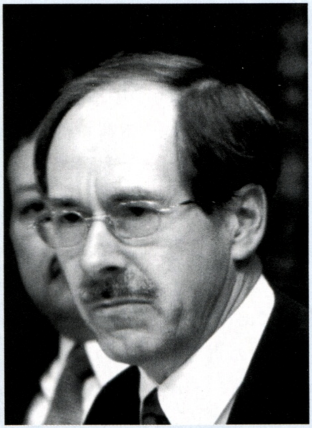
上のバーテックスは E に比例し，中間状態のベクトルボソンの両端には実粒子が結合しているので，このダイヤグラムも高エネルギーで E^2 のように振る舞う（電荷をもつ W はそれぞれ E，電子はそれぞれ $\sqrt{E}$，ベクトルボソン3個の結合が E，そして中間状態のベクトルボソンが $1/E^2$ に比例する）ことは確かである。いろいろなバーテックスの結合定数の大きさと符号を正しく選ぶと，確かに打ち消し合いが起こる。そして2つのダイヤグラムの和は，エネルギーが大きくなると定数に近づく。





スティーブン・ワインバーグ (Steven Weinberg, 1933)と**マルティヌス・ヴェルトマン**(Martinus Veltman, 1931)。ワインバーグと私は，あることについては意見を異にする。上の写真は，1999 年のノーベル週間のものだ。私が納得できないいくつかの点について，ワインバーグが説明している。1967 年，ワインバーグは後にもっとも有名になる論文(1979 年にグラショー，サラムとノーベル物理学賞を共同受賞した論文)を書いた。だが 1971 年(アムステルダム会議以降)に彼のモデルの数学的一貫性が明らかになるまで，その論文はほとんど注目されなかった。彼の論文は，実験的な帰結がひとつだけ述べられていただけで，あまり注意を引かなかったのである。そのうえ，その結果をあまり深刻に考えなくてもよいとの注釈まで付いていた。実際，深刻に捉える人はいなかった。ワインバーグは，1967 年から 1971 年を自分の論文が冬眠していた期間とよんでいる。とはいえ私の知るかぎりでは，現在，素粒子物理学分野において，もっとも引用回数が多いのが，彼の論文である。その次が小林と益川(第 3 章参照)の論文だ。

1972 年，フェルミ研究所で開かれた会議で，「弱い相互作用理論の展望」と題するプログラムがあり，ベン・リー(Ben Lee)がワインバーグの論文の意義を明らかにする講演を行った。ベン・リーの講演は，ゲージ理論のいろいろな側面を多くの聴衆に説明した点において非常に重要だった。その後まもなく，巨大なフランス製泡箱ガルガメルを用いたセルンのニュートリノ実験によって，中性カレント(Z^0 が存在する証拠)の存在が確認された。ワインバーグの論文には，現在の標準モデルにとって不可欠な構成要素が取り入れられている。つまりグラショーが提案していたモデルに，ヒッグスの力を取り入れたのだ。今では，ヒッグス力を用いないゲージ理論は，数学的に矛盾することがわかっている。

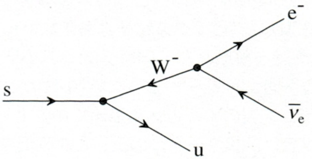
シェルドン・グラショー(Sheldon Glashow, 1932)と**ヘラルディス・トホーフト**(Gerardus 't Hooft, 1946)。標準モデルをつくるのに大きく貢献した人物として，グラショーの名前があがるのは間違いない。1963 年のグラショーの論文は，レプトンとベクトルボソン(Wと Z^0)の相互作用を提案した。Z^0 を導入しただけでなく，さらに光子と Z^0 との混合も示したのである。この論文は，ワインバーグの出発点となった。ゲルマンのレプトン-ハドロン対称性という考え(8章末参照)を適用した，日本人物理学者，原康夫(Yasuo Hara)はアップ，ダウン，ストレンジに次ぐ 4 番目のクォークを導入した。現在，チャームクォークとよばれているクォークだ。グラショーは，イリオプロス(Iliopoulos)とマイアニ(Maiani)とともに，これら 4 種類のクォークとベクトルボソンの相互作用の正しい形を追及した(ヒッグス粒子は含まない)。彼らは，K 中間子のある種の崩壊が起きないという謎を解明した。GIM メカニズムとよばれるメカニズムだ。ニュートリノ反応ではミューオンや電子が生じない(中性カレント)問題に関する議論も行われた。1973 年，フランス製のガルガメル泡箱で中性カレントによる現象が観測されたことで，多くの物理学者は，標準モデルの正しさを確信するようになった。

私自身が，こみ入った数学的な問題に本格的に取り組みはじめたのは，1968 年にゲージ理論の重要性を確信してからのことである。博士課程の大学院生として入ってきたトホーフトが，ゲージ理論を数学的に解明する仕事を完成させた。彼がすばらしい仕事を成し遂げてくれたので，私はおおいに満足だった。おかげで，1971 年のアムステルダム会議において，私は自信をもって彼を物理学界に紹介することができた。会議の世話役だった私は，プログラムを自由に設定することができたのである。

E^2 の振る舞いを打ち消す代償として，中性のベクトルボソンというまったく新しい粒子を導入する必要があった。ゲージ理論の勝利の幕あけである。必要とする結合定数をもつ中性のベクトルボソンが，実際に発見されたのだ。その粒子は Z^0 とよばれ，電荷を帯びた W よりもわずかに大きな質量 91.187 GeV をもっている。

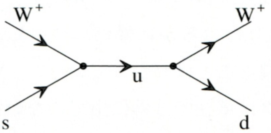
9.9 チャームクォーク

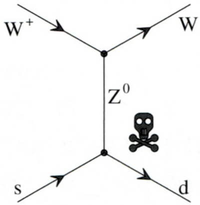
これまでにあげてきた以外に観測された相互作用のひとつが，Λの崩壊だ。重いこと以外の点では，この中性の粒子は中性子とよく似ている。中性子は 940 MeV だが，この粒子の質量は 1116 MeV もある。Λ粒子は d が 1 個，u が 1 個と s (ストレンジ) クォーク 1 個からできている。このことから，s クォークが d クォークに比べて 200 MeV ほど重いことが推測できるだろう。Λの崩壊の仕方はいろいろある。質量が大きいのでたくさんのエネルギーを使うことができるからだ。そのひとつは中性子崩壊，つまり，中性子が陽子，電子，反ニュートリノへ崩壊するのと非常によく似ている。この崩壊は，s クォークが u クォークと W^- に壊れることによって起こると考えられている。続いて W^- はすぐに電子と反ニュートリノに崩壊する。下の図を見てほしい。



ここで出てきた s-u-W バーテックスの結合定数は，d-u-W バーテックスの結合定数の，約 $\frac{1}{4}$ 程度の大きさしかない。この大きさの比は，カビボ角とよばれる角度 θ_c を使って $\tan\theta_c$ と表されると考えられている。すっかり定説化したこの理論では，d クォーク崩壊が結合定数 g と $\cos\theta_c$ に比例するのに対し，s クォーク崩壊は $\sin\theta_c$ に比例する。次の図の左側のダイヤグラムで表されるような s クォークと W の散乱が，高エネルギーで正しく振る舞うためには，どうしたらよいだろうか。この図には，中性子とΛの崩壊に効いてくるクォー

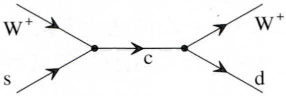
ク-W バーテックスが2つとも現れている。クォークも電子と同じスピン$\frac{1}{2}$の粒子なので，電子のときと同じく，この散乱過程の高エネルギーにおける振る舞いも悪いと考えられる。





前と同様に，右側の図のように Z^0 を含むダイヤグラムを付け加えれば，今度も振る舞いがよくなるのではないかと思うだろう。そうは問屋が卸さない。ダイヤグラムが存在するためには，s-Z^0-d のバーテックスが必要なのだが，そんなものは実験では見つかっていない。素粒子理論では，「ストレンジネスを変える中性カレントは存在しない」(s クォークはストレンジネスをもつが d クォークはもっていない)と表現されている。では，どうしたらよいだろうか？

u クォークと似た性質をもつ粒子がもうひとつあり，その粒子が W とうまい具合に相互作用すると仮定すればよい。その粒子は，次の図に示すように，前の図における u クォークとまったく同じ役割を果たす。この新しい粒子はチャームクォークとよばれている。



s-c-W バーテックスの結合定数を，中性子崩壊のときと似たようなものだと仮定しよう。つまり，このバーテックスが $\cos\theta_c$ に比例するのに対し，c-d-W バーテックスは $-\sin\theta_c$ に比例すると考えよう。マイナス符号をつけると，高エネルギーでは2つのダイヤグラムが互いに打ち消し合って，両者の和は有限となり，ほぼ一定の値になる。

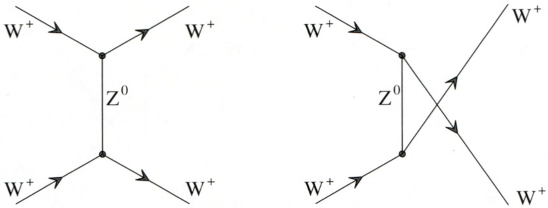
そのころ，まるで打ち合わせでもしたかのように，実験家が c クォークを発見した。いや，クォークは単独では外に出てこないので，c クォークを含む新粒子を発見したというのが正しい。c クォークの質量は 1500 MeV 程もあり，d クォーク(7.5 MeV)や u クォーク(5 MeV)，s クォーク(200 MeV)と比べると非常に重い。といっても，後に見つかった b クォーク(ボトム，5000 MeV)や t クォーク(トップ，175 000 MeV)よりははるかに軽い。ついでに言っておくと，クォークの質量に関しては，正確なことはわかっていない。軽いクォークについてはなおさらである。クォークは単独では外に出てこないし，エネルギーのかなりの部分は，クォーク特有の閉じ込めと関係している。実験で見つかる束縛状態のエネルギーから，クォークの質量を計算で導くしか手はないが，いろいろこみ入ったことが絡んできて難しい。

c クォークの発見は，ゲージ理論にとって，2番めに大きな成功だった。相互作用の結合定数が，まさに上に述べたように $\cos\theta_c$ と $\sin\theta_c$ に比例していることがわかったのである。しかし，これで一件落着というわけではない。

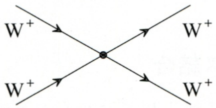
9.10 ヒッグス粒子

次にベクトルボソンだけを含む反応を考えよう。もちろん，今から考える散乱過程を実際に実験できる研究所はないので，この議論は架空のものだ。ベクトルボソンの寿命は非常に短いので，実際に入射粒子や標的として使うことはできない。ともかく，ベクトルボソン同士，なかでも W^+-W^+ の散乱を考えることにしよう。この散乱には次の2つのダイヤグラムが寄与するが，それらの高エネルギーにおける振る舞いはどうしようもないくらいに悪い。前の場合には，スピン $\frac{1}{2}$ の粒子があったが，今度はすべてスピン1の粒子ばかりだ。一般に，スピンが大きいほど，振る舞いは悪くなる。大きな修正を行う必要がある。

W-W-Z^0 のバーテックスはエネルギー E に比例する。エネルギーの巾を数えると，このダイヤグラムは E^4 に比例することがわかる。外に出ている4本の W はそれぞれ E に，中間状態の Z^0 は(両端とも実粒子に繋がっているので) $1/E^2$ に比例し，2つのバーテックスから E^2 の因子が出てくることから，全部で E^4 に比例することになる。



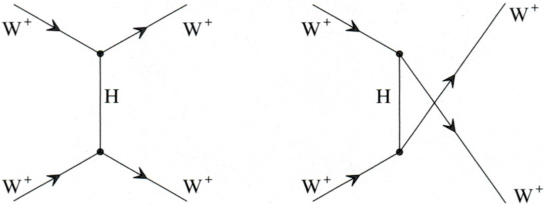
一番振る舞いの悪い部分は，まったく新しいタイプの相互作用を持ち込めば打ち消すことができる。そのためには次の図に示すように，4 つの W の直接相互作用を導入すればよい。



この新しいバーテックスの結合定数をうまく選ぶと，悪い振る舞いをほとんど打ち消すことができる。だが，まだ問題が残っている。

図中のバーテックス自体はエネルギーに依存していないので，外側の 4 本の W から E^4 の因子が出てくる。これらの因子の振る舞いによって，E^4 の振る舞いを打ち消すことができる。しかし,E^2 で振る舞う部分がまだ残っているので，これだけでは足りない。次元は E^4 の部分と同じはずだから，M^2E^2 もしくは $M_0^2E^2$ のような振る舞いが残っているのである。ここで，M と M_0 はそれぞれ W ボソンと Z^0 ボソンの質量を表す。この散乱過程では，エネルギーの次元を持つパラメーターは，この 2 つの質量以外には存在しない。どうすれば，E^2 の振る舞いを打ち消すことができるのだろうか？

この点を解決するためには，ヒッグスボソン H というまったく新しい粒子を持ち込む必要がある。W や Z^0 との相互作用の強さが，E^2 の振る舞いをちょうど打ち消すようなスピンをもたない中性の粒子である。次の図は可能な 2 つのダイヤグラムを示している。



つまり，ヒッグス粒子とベクトルボソンの結合の強さは，ベクトルボソンの質量に比例することになる。ヒッグス粒子とほかの粒子との相互作用には，いつでもこの不思議な性質が現れる。

9.11　一般的なヒッグス結合

これで話が終わるわけではない。以前に少しふれたような細かい問題はたくさんあるが，あまり細かな話はやめにして，ヒッグス粒子が，中性のベクトルボソン(Z^0)やクォークとも同じように相互作用することを指摘するにとどめよう。つまり，質量をもつ粒子は**すべて**ヒッグス粒子と相互作用する。

ヒッグス粒子はまだ見つかっていない。残念ながら今のところ，理論的にその質量を知ることもできない。それほど重くはない(例えば1000 GeV以下)ようだ。そうでなければ，悪い振る舞いを打ち消そうとしても追いつかない。現時点における実験的な結果からは，およそ100 GeVより大きいことがわかっている。セルンで建設されているLHCという新しい加速器では，それぞれエネルギー7000 GeVの陽子どうしを衝突させる予定だ。この加速器が完成すれば，多分ヒッグス粒子のことがもう少し詳しくわかるだろう。陽子はuとdクォークからできているが，どちらも質量は小さい。したがって，ヒッグス粒子との結合が弱いため，ヒッグス粒子をつくるのは簡単ではない。ヒッグス粒子をつくるには，WやZ^0など重い仮想粒子を含む高次の効果が必要になる。

ここで用いた粒子だけを使って，悪いエネルギー依存性をすべて消してしまうことを，理論のくりこみ可能性の証明とよぶ。これまでの議論だけでは，果てしなく新しい粒子を導入し続けなければならないように見えるかもしれない。だが，最後のひとつがヒッグス粒子なのである。



ユリウス・ヴェス(Julius Wess, 1934), **マリー・ガイヤール**(Mary Gaillard, 1939), **ブルーノ・ズミノ**(Bruno Zumino, 1923)。マリーKとして知られるマリー・ガイヤールが, B. リーとともにチャームクォークを探しはじめたのは, 発見の6か月前のことだった。彼らの予言したチャームクォークの質量は1.5~2 GeVで, 現在知られている値と驚くほど近い。彼らが用いた方法は, 第9章9節で議論した方法とよく似ている。チャームクォークが実在することを初めて示したのが, J/ψ の発見だ(リヒターとティンの写真ページを参照)。

この粒子 J/ψ こそが, チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態だった。とはいえ, この粒子の寿命があまりにも長かったために, その解釈が確立するまでには, しばらく時間がかかった。マリーKの推定した寿命は10倍短かったが, だからといって, この予言者的な理論の素晴らしさが損なわれるわけではない。だが, 残念ながら, その功績は十分に認識されていないように思う。ヴェスは, もちろん立派な理論家である。だが個人的には, マリーKの夫, ズミノがミスター超対称性とよばれるのに相応しいと思う。1974年, ズミノとヴェスは, 初めて4次元の超対称理論を提出した†。

当時, ジェルヴェと崎田による数学的要素の濃い研究を元に, 何人かのロシア人が, 似たような内容について研究していた。だが, ヴェスとズミノの研究こそが, 超対称性を現実の物理学に持ち込んだのである。ズミノは超対称性の数学的側面を, 長年にわたって大変活発に研究した。1959年, 私がナポリの夏の学校に初めて出席したとき, 講師のひとりがズミノだった。驚いたことに, 2000年のパリ会議のときもなお, ズミノが講演していた。彼はセルン理論グループの責任者を何度か務め, 現在はバークレーで研究を行っている。超対称性が実証された暁には, ヴェスとズミノはもっと正当に評価されるべきだろう。

---

† (訳者注)ボーズ粒子とフェルミ粒子を混ぜる対称性は, 宮沢弘成と菅原寛孝によって最初に提案された。超対称場の理論をつくったのはヴェスとズミノだ。

これまでの議論がどのくらい歴史的な発展を反映しているかにふれておこう。たくさんの粒子を上手に組み合わせ，お互いの相互作用の強さをうまく調節して，くりこみ可能な理論をつくるおおまかな流れをこれまで述べてきた。そして得られた理論が大きな対称性をもっていたという説明は，実は歴史的な発展とは順序が逆さまになっている。先に発見されたのは対称性のほうだった。結果として理論がくりこみ可能になることは，20年も後にわかったのだ。

9.12 推　測

ヒッグス粒子がすべての粒子の質量と密接に関わっていることがわかると，つい，実際にヒッグス粒子のおかげでそれらの質量が生じていると考えたくなる。だが，今のところ，質量の起源についての手がかりはない。質量は自由パラメーターなので，実験的に決めるしかない。たいした想像力をはたらかせなくても，ヒッグス粒子が重力と関係しているのではないかと推測はできる。実際に，重力で形成されていると考えられている宇宙の構造にヒッグス粒子が強く関わっていることを示唆する理論的モデルも提唱されている。ヒッグス粒子は実際には存在しないと考える人もいる。その場合には，重力が本質的に関わるもっと複雑なものと，単に姿が似ているだけだとも考えられる。

これらの疑問や推測は大変刺激的で興味をそそる。質量やカビボ角の大きさの問題や，なぜクォークがこんなにたくさんあって世代ごとに分かれているのか，等の疑問も未解決のままである。それらの疑問に満足に答えられる理論は，今のところ存在しない。わからないことが山ほどある。だからこそ，LHC実験が待ち望まれているのだ。もちろん，素粒子の相互作用の仕組みを理解する上で，我々が非常に大きな進歩を遂げたことも事実である。

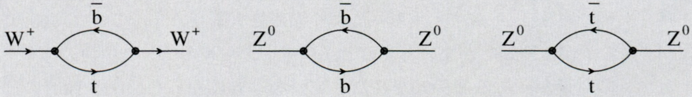
9.13　ρパラメーター

W^+-W^+散乱に加えて，W^--Z^0やZ^0-Z^0散乱なども考えなければならない。これらすべての散乱が，高エネルギーでよく振る舞うようにすることは可能だ。ヒッグス粒子が1種類しかないとすると，荷電ベクトルボソンと中性のベクトルボソンの質量が，ある関係式を満たしていなければならない。一般的には$\rho=1$という式だ。ただし，Wの質量(80.3 GeV)をM，Z^0の質量(91.2 GeV)をM_0とするときには，$\rho=M^2/(M_0^2\cos^2\theta_w)$と定義する。この角度$\theta_w$を説明するためには，弱い力と電磁相互作用の関わりを詳しく説明する必要がある。これは，Z^0の両端に荷電粒子が結合する場合，Z^0の代わりに光子が結合できるからである。実験的には$\sin^2\theta_w\approx 0.2315$ということがわかっている。この議論を終えるにあたり，ρが予言値と一致することから，ヒッグス粒子は1個で十分であることを述べておこう。

$\rho=1$という関係式には，高次補正の効果が現れる。とりわけトップクォークの質量が影響してくる。トップクォークが重くなればなるほど，その効果は大きくなる。これは，中間状態のエネルギーが大きいほど，量子効果が大きくなる珍しい例である。トップクォークが実際に発見されるはるか前から，量子効果の測定値を用いた，トップクォークの質量の予言が行なわれていた。予言されていた値は，実験値とよく一致している。

トップクォークの質量とともに放射補正が大きくなるのは，ゲージ理論の構造から導かれる典型的な帰結だ。ゲージ理論の枠組みにおいて，トップクォークはひとつの役割を担っている。もしトップクォークが存在しなければ，トップクォークによって打ち消されるはずだったダイヤグラムの，悪い振る舞いが再び姿を現わしてくる。つまり，トップクォークが無限に重いと考えて，理論から追い出してしまうと，無限大が出てくるのである。次ページに，関係するダイヤグラムを示してある。W^+とZ^0は，短い時間なら，クォーク-反クォーク対に分かれることができる。このようなダイヤグラムを自己エネルギー・ダイヤグラムという。ここで議論している効果は，最初のダイヤグラムから，2番目と3番目のダイヤグラムの和に$\cos^2\theta_w$を掛けて引き算したものに対応している。最初のダイヤグラムがM^2に対応するのに対し，後の2つのダイヤグラムはM_0^2に対応するからだ。ここで重要なのがトップクォークの役割だ。もしトップクォークが存在しなければ，2番目のダイヤグラムだけになってし

まうが，この2番目のダイヤグラムだけを取り出しても無限大が残ってしまうからである。



10 ヒッグス粒子を求めて

現時点まで，標準モデルは非常に順調である。まず，ファインマンダイヤグラムにおける不適切な振る舞いを相殺するために必要とされた新しい粒子とその相互作用が，正しいことがわかった。さらに，理論的な計算による複雑な量子補正も実験結果と一致した。とりわけ劇的だったのは，ρ パラメーターの量子補正とトップクォークの質量である。このすばらしい発見について，もう一度，簡単にふれておこう。第9章の議論の一部を，少し違った見方から繰り返すことになるが，とりわけ難しかった9章の話を理解している必要はない。

まず，ヒッグス粒子がいくつあるか考えよう。まったく存在しないとすると理論的な困難が克服できなくなってしまう。だが，存在する場合，個数に制限はない。最初の疑問は，ヒッグス粒子はいくつあるのだろうというものである。手がかりがないわけではない。

理論のみでは，ベクトルボソンの質量を予言することはできない。実験的な測定が必要だ。前の章で述べた理論的問題を，たった1個のヒッグス粒子で解決しようとすると，荷電ベクトルボソン（W^+や W^-）の質量と中性ベクトルボソン（Z^0）の質量の比が，特定の値に決まる。したがってベクトルボソンの質量を測れば，ヒッグス粒子の個数に関する手がかりが得られる。実験で測られたベクトルボソンの質量は，ヒッグス粒子が1個でも問題はないことを物語っている。

しかし，少々厄介なこともある。Z^0 等のベクトルボソンの質量は，量子補正（輻射補正または放射補正ともよばれる）の影響を受けるのだ。Z^0 等のベクトルボソンは，ほんの一瞬，いろいろな質量をもつ粒子と反粒子に分かれる。



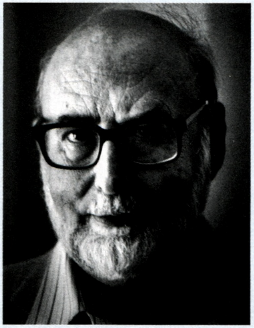
ピーター・ヒッグス(Peter Higgs, 1929)　標準モデルにおける大きな謎，ヒッグス粒子と切り離せない人物がヒッグスだ。超伝導物質中への電磁場の侵入に関するアンダーソン(Anderson)の重要な論文を受けて，ヒッグスは研究を展開していった。アンダーソンは電磁場の侵入がほんのわずかな距離であることを発見し，理論的な説明を行った。ヒッグス(およびブロウトとアングレアも)は同じ機構を用いて，質量をもつ光子の理論を構築した。質量をもつ光子の力は，有限距離しか届かない。この点が標準モデルをつくる上で重要な材料となった。ただし，光子は質量をもたないことがわかっているので，よく似たベクトルボソンの W と Z に質量を与えるために使われた。後に，理論を数学的に意味あるもの(くりこみ可能)にするためには，この機構が不可欠であることが判明している。

私がヒッグスと初めて会ったのは, 1959年, エジンバラで開催された夏の学校だった。組織委員の 1 人だった彼は，なんと，ワイン蔵の鍵を持っていた。欲しいものを寛大に察してくれる彼のおかげで，特にカビボと私は大変楽しい日々を過ごすことができた。

同じ夏の学校の教授だったポルキングホーン(Polkinghorne)は，ある本(Rochester roundabout[†])で，「ヒッグスは有能な理論家だが，並外れて傑出しているわけではなかった」と述べている。同じ本には(文句なしに大変すばらしい物理学者である) X という人物について，「X はとても思慮深いが，なかなか自分の考えを発表しない」と書いてある。ポルキングホーンは，ヒッグスの考えと X との関係について，「頭脳明晰で想像力溢れた X 自身が，ヒッグスの考えにたどり着かなかったのは，もっとも驚くべき点ではないだろうか」と書いている。1979 年，ポルキングホーンは英国国教会の司祭になると同時に，英国国教会司祭の中でもっとも優れた物理学者となった。最近，彼はテンプルトン賞という権威ある賞を授与された。この賞は，異なる宗教の間，つまり意味と無意味の間を橋渡しするという，非常に大変なことを成し遂げた人に贈られるものだ。

---

† 　(訳者注)ジョン・ポルキングホーン著　大場一郎・木造芳樹共訳『紙と鉛筆と加速器と ――素粒子物理の興亡』(丸善)1994 年。

ロバート・ブロウト(Robert Brout, 1928, 左)と**フランソワ・アングレア**(François Englert, 1932, 右)。ヒッグス系を導入した立役者として，ヒッグスと同じように，ブロウトとアングレアの名前をあげなければいけない。今のところ，ヒッグスだけが有名になって，ブロウトとアングレアは，世間の人々にあまり知られていない。

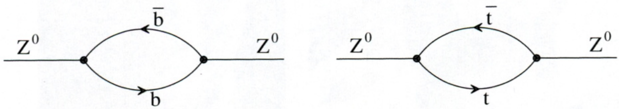
ベクトルボソンの理論がくりこみ可能になるかもしれないということに初めて気がついたのは，おそらくブロウトとアングレアだろう。1967 年のソルヴェイ会議で行われたワインバーグ講演における議論で，アングレア自身も，そのように述べていたようだ。ワインバーグが保存している 1967 年の論文の手書き原稿には，そういった記載が見られる。とはいっても，ベクトルボゾンの理論がこれほど複雑だとは，誰も想像していなかっただろう。

実は，私はブロウトとアングレアに少々罪悪感を感じている。ヒッグスの研究を聞いた 1971 年以降，ブロウトとアングレアの仕事を知らなかった私は，初めの頃彼らの研究を引用していなかったからだ。彼らがヒッグスほど有名にならなかった原因には，このことも影響しているのではないだろうか。2 人の業績が広く知られるようになったきっかけは，1997 年に，ヒッグスとともに，ヨーロッパ物理学会の高エネルギー素粒子物理学賞を受賞したことだろう。

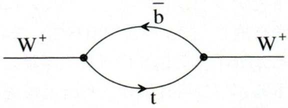
1958 年頃，私はユトレヒトでブロウトに会った。とても印象的な人だった。その後のブロウトが，同じ物理学でも，アンダーソンに近い分野を研究していたため，我々が再会を果たしたのは，随分後になってからである。

アングレアも同席している夕食の席で，私はたったひとり(自分自身)のデータに基づいて，ある仮説を提案したことがある。それは，夏に生まれると知能が高くなる，特に 6 月生まれが 1 番，というものだった。11 月生まれのアングレアは，自分はユダヤ人だから，この仮説には当てはまらないと答えた。それから笑い出したのだが，あまり激しく笑うので，命に別状がないか不安になるほどだった。念のために書いておくと，私の予想はノーベル賞受賞者については平均的に当てはまっている。残念ながら，アインシュタインは 3 月生まれだ。

そのため，Z^0 の質量を測定すると，始めの値と少しずれていることがわかる。このとき，中間状態として出てくる粒子は，Z^0 と結合する粒子ならなんでもよいので，トップやボトムなども現れる。次の図で，それら2つの可能性を示した。

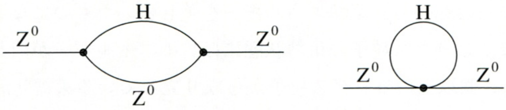


荷電ベクトルボソンの場合も同じである。測定される W^+ の質量も，仮想粒子対の影響を受ける。この場合の仮想粒子対の種類は，Z^0 のときほど多くはない。電荷の保存則による制約もある。次の図では，反ボトムクォークは電荷 $+\frac{1}{3}$ をもち，そしてトップクォークは電荷 $+\frac{2}{3}$ をもつことを思い出してほしい。



W^+ と W^- の質量は等しい。また，それらに対する量子補正も等しい。しかし，Z^0 の質量と W^+ の質量に対する量子補正は同じではない。そのため荷電ベクトルボソンと中性ベクトルボソンの質量の比は，量子補正で少し変化する。この小さな変化については，理論的な計算も実験的な測定も行われている。変化する大きさはトップとボトムクォークの質量に依存するので，実験値を用いて，逆にトップクォークの質量を決めることもできる。ボトムクォークは70年代に発見されているので，質量は当然わかっている。トップクォークの質量はこのように予言された。そして発見されたトップクォークの質量と見事な一致を見せたのである。この事実は，実験家が1995年にトップクォークを発見するときにも役に立った。探索を始める前に，どのあたりの質量に注目すればよいかあらかじめわかっていたからだ。当時，ノーベル委員会は悩みこんでいた。素粒子の質量を予言し，実験的に確立するような研究を探していたのである。そして最終的には，1999年の私たちのノーベル賞に落ち着いた。

ヒッグス粒子に話を戻そう。この粒子もベクトルボソンの質量測定やその比



に影響を及ぼすかもしれない。上の図のように，読者の想像力をくすぐるような変なダイヤグラムも現れる。

ヒッグス粒子と Z^0，W^+との相互作用は，それぞれ強さが異なっている。したがって，このダイヤグラムは確かにベクトルボソンの質量比に影響している。ボトムやトップクォークに比べると，この効果はずっと小さい。しかし，ヒッグス粒子の質量と補正の大きさがわからないかぎり，トップクォークの質量をはっきりと予言することはできない。トップクォークの質量の予言に，5% の不定さがあったのはそのためである。しかし，いったんトップクォークが発見されて質量がわかれば，この小さな効果から，逆にヒッグス粒子の質量を予測することができる。ヒッグス粒子の質量に対するこの予言は，正確さには欠ける。今日でも 110 GeV 以上程度というだけで，誤差も非常に大きい。

では，現状をまとめよう。ヒッグス粒子が存在するならば，個数は 1 個であり，おおまかな質量も予測済みである。しかしヒッグス粒子の存在自体は不確かで，なかなか込み入った問題である。

既知の粒子がすべてヒッグス粒子と相互作用すると考えるなら，ヒッグス粒子自身と相互作用することもあると考えるべきだろう（もちろん，ヒッグス粒子が見つかったら，すべての相互作用の存在を確かめなければならない）。だとすれば，2 個のヒッグス粒子同士が引き合うことなど，さまざまなことが起きるだろう。実に驚くべきことが起きるかもしれない。ヒッグス粒子の自己相互作用の強さによっては，ヒッグス粒子の束縛状態が存在するかもしれない。非束縛状態と違って，束縛状態には，負のエネルギーをもつという重要な性質があることを覚えている読者がいるかもしれない。束縛状態の中の粒子を互いに引き離すには，エネルギーが必要であることを思い出せばすぐにわかる。例えば，水素原子の中では，電子が陽子に 13.6 eV で束縛されている。そのため水素原子から電子を引き離すには，13.6 eV のエネルギーが必要になる。このように，束縛状態には質量エネルギーのほかに負のエネルギーが存在しており，束縛エネルギーとよばれている。水素原子 1 個のエネルギーは，電子と陽子の

質量エネルギーの和から，束縛エネルギーを差し引いたものになる。

このように，ヒッグス粒子の束縛状態には負のエネルギーが関わっている。2個あるいは3個以上のヒッグス粒子から成り立っている束縛状態もあるかもしれない。さらに，無限個のヒッグス粒子でできた束縛状態があるかもしれない。そのような場合における束縛エネルギーは，構成要素のヒッグス粒子の質量の和よりも大きいだろう。すると，この状態の全エネルギーは負になるので，無から出発してこの束縛状態をつくれば，エネルギーを得ることができる。この考えは非常におもしろいが，気がかりな点もある。宇宙が始まるとすぐに，このような状態(実際には無限に広がっている)がつくられたはずなのである。だとすれば，これまでに発見されないわけがない。つまり宇宙の至る所にヒッグス粒子があるような状態は，重力によってすぐに検知されるはずなのである。さらにその結果，宇宙はサッカーボール位の大きさに曲がってしまうことが，計算結果からわかっている。この毒を理論的に制するには，理論的な毒をもってするしかない。つまり，ヒッグスの束縛状態ができる前のもともとの宇宙の曲率が，ちょうど大きさが等しく反対符号だったと考えるのだ。そうすれば，曲率が打ち消し合って平坦な宇宙ができ上がるはずだ。もともと関係をもたない曲率どうしがちょうど打ち消し合うための何か別の原理がないとすれば，まったく信じがたい出来事である。天文学者の観測によると，宇宙はほとんど平坦で，銀河質量などによる曲率さえ見えないらしい。この点は相当の難問だ。やはり，ヒッグス系と重力の間には何がしかの関係があるに違いない。なんとも不思議な話である。

これまであげたすべての事実が，ヒッグス粒子には何か隠された謎があると告げている。ただ単にヒッグス粒子が150 GeV程度の質量をもち，既知の粒子とこれこれの相互作用をするという単純な描像ではなく，何かまったく違ったことが起こることを期待してもよいのではないか。とはいっても，ヒッグスには，散乱過程の悪い振る舞いを打ち消すという，果たすべき役割がある。満たすべき要件もいくつかあるので，ヒッグスの探索はなんでもありというわけにはいかない。

理論的に重要なことがある。ヒッグス粒子の自己相互作用の強さはヒッグス粒子自身の質量に関係しているということだ。このため，ヒッグス粒子が重い場合には，軽い場合に比べてヒッグス粒子同士の相互作用が強くなる。ヒッグ

ス粒子があまり重くなると，自己相互作用が強くなりすぎるため，摂動論が破綻してしまう。この場合には，何回も自己相互作用するダイヤグラムが，数回しか自己相互作用しないダイヤグラムと同じ程度に寄与することになる。このような状況では，理論家は正確な定量的予言をすることができなくなってしまう。

現状をまとめておこう。ヒッグス粒子の質量が500 GeVよりも大きければ，ヒッグス粒子の効果は大きくなって観測できるようになるが，大きさを精密に予言するのは難しくなる。少し気になるのは，実験的な見地からすると，ヒッグス粒子がほかの粒子よりも重そうな点である。実際に重ければ，ベクトルボソンの質量比の計算自体も信頼できないので，それらを用いてヒッグス粒子の質量を予言することはできなくなる。この仮説が正しいなら，現時点におけるデータからヒッグス粒子の質量を予言するなど，冗談以外ではありえない。つまり，実際にヒッグス粒子を発見する以外に道はない。さもなければ，ベクトルボソン散乱などによって，ヒッグス粒子が悪い振る舞いを打ち消す様子をつぶさに観察するしか手はなくなり，理論は役に立たなくなってしまう。助けを求めるしかない。混迷を打ち破る実験を待望するのみだ。

光明となりうる事実がないわけではない。セルンの大型ハドロンコライダーは，今世紀初頭の10年以内に，間違いなく運転を開始する。少なくともいくつかの未解決問題に答えることができるだろう。ヒッグス粒子の質量があまり大きくなければ(400 GeV以下)，粒子そのものの発見も期待できる。しかし，この装置によって，ヒッグス粒子が隠れていそうなすべての領域を探索できるわけではない。その意味では，計画中の高エネルギーの電子-陽電子コライダー†に，大きな期待が寄せられている。この加速器で，ヒッグスの自己相互作用を実際に測ることができるかもしれない。まったく予期しないことが起きるのは，間違いないだろう。

† (訳者注)日本，アメリカ，ヨーロッパが中心となった，ILC (International Linear Collider)が計画されており，大きな期待を寄せられている。

11 量子色力学

11.1 序　　論

荷電粒子と光子の相互作用を表す理論を，量子電磁気学，略してQEDという。また，クォークとグルーオンの相互作用を記述する理論を，量子色力学，QCDという。こちらはさらに複雑な理論である。アップクォークとダウンクォークを結びつけて陽子，中性子などの束縛状態をつくるのに欠かせないのが，クォーク-グルーオン相互作用である。これらの束縛状態については，第8章の粒子動物園で述べた。

摂動論を使えば，電子と光子の相互作用がうまく表せる。つまり，バーテックス(頂点)をほんの少ししか含まない簡単なダイヤグラムだけで説明することができる。それぞれの頂点は，$\alpha \approx 1/137$ の因子に対応するので，多くの頂点をもつダイヤグラムほど小さい。クォークやレプトンと W や Z^0 (あるいはゲージボソンどうし)の相互作用についても同様なことが成り立つ。その場合，結合定数 $\alpha_w \approx 1/40$ の値も，QEDと同じくとても小さい。だがQCDでは，そうはいかない。クォークとグルーオンの結合定数は大きく，ほぼ1に近い。言い換えると，たくさんの頂点を含むダイヤグラムも，頂点をわずかしか含まないダイヤグラムと同じように重要だということだ。したがって，もはや摂動論は使えない。この点が理論家を困らせている。とはいえ，いろいろな研究が行われて多くのことがわかってきたのも確かである。しかし，これまでに陽子やパイ中間子の質量を計算してみせた人は誰もいない。だがこれらの粒子は，間違いなくクォークの束縛状態である。



クロード・ブシア (Claude Bouchiat, 1932, 左), **ジョン・イリオプロス**(John Iliopoulos, 1940, 中央)と**フィリップ・メイエア**(Philippe Meyer, 1925, 右)。標準モデルの発展に大きな役割を果たしたのが, 彼ら3人の理論家である。クォークを入れないレプトンだけの標準モデルには問題があった。無限大という厄介物が潜んでいたのだ。この問題を解決に導いたのが彼らだった。クォークの側にも同様に厄介な無限大が存在すること, しかもレプトンのものと符号が反対なので, 両者を足し合わせることで無限大が打ち消し合うことを示したのである。打ち消し合いが可能なのは, 各々のクォークが3色ある場合だけだった。第2章で説明した色つきクォークの描像を強く支持する彼らの研究があったおかげで, 色とグルーオンからなる量子色力学を皆が信じるようになったのである。

ブシアは生粋のフランス人で, ルイ・ミッシェル(Louis Michel)の学生だった。ド・ブロイとその後継者達に押さえつけられていたフランスの理論物理は一時期停滞していたが, ミッシェルとブシアは例外だった。ミッシェルから聞いた逸話を紹介しておこう。

エコール・ポリテクニーク(理工科大学)の研究所長だったルプランス・ランガ(Leprince-Ringuet)は, 彼の研究所にも理論家を置くことに決めた。おおかた格好をつけたかったのだろう。それでミッシェルを雇った。ときおり来客を案内してきてはミッシェルの部屋のドアを開け,「ここには我々の理論家がいるんだ!」と大声で告げるのだった。見せおわると, ドアをばたんと閉めた。

イリオプロスは標準モデルの別の部分にも貢献した。グラショウ, マイアニと一緒に, チャームクォークを標準モデルに取り入れたことで有名なGIMの論文を書いたのである。

メイエアはアメリカ合衆国で教育を受けた。つまり, 例のフランスの停滞時期をうまく避けることができた。そしてブシアと一緒にオルセーの素粒子論グループを立ち上げた。このグループが企画した国際的な物理学の夏の学校は, 若い研究者が一流の理論家と交流するために, 重要な役割を果たしている。私も10年間ほど参加を続けて, 自分の学生を研究仲間に紹介した。しばらくして, 彼らのグループはパリのエコールノルマールに移って理論グループを立ち上げた。地価の高いパリで場所を確保するのは難しかったらしい。

光子とグルーオン間におけるもうひとつの大きな差異は，相互作用である。光子間には，基本的な相互作用は存在しない。光子には電荷をもつ粒子と相互作用する性質があるが，光子自身は電気的に中性なので，光子と相互作用することはない。一方，8種類のグルーオンは，それぞれお互いに相互作用する。この相互作用がどのような意味をもつか知りたかったら，電荷をもつ光子が1つあるところを想像してみるとよい。こちらの光子をγ_cで表そう。もともとの中性の光子(γ)は，この荷電光子とも相互作用する。なぜなら光子は，電荷をもつかぎり，どんな粒子とでも相互作用するからだ。さて，ここに原子核があるとしよう。原子核の周りには，遠くまで届く電場，すなわちクーロン場ができる。このクーロン場は，本質的には光子(γ)からできている。さらに，クーロン場と同じく，長距離にわたって作用するもうひとつの場があるとしよう。この場は荷電光子(γ_c)からできているので，電荷をもつ。ここで，問題となるのは，この2つの場が相互作用すると非常に複雑な状況が起こることだ。グルーオンの場合にも同じようなことが起きるのである。各々のグルーオンは，クォークの周りにクーロン場のような場をつくる。これら8種類の場が相互に作用するので，どうしようもないほど複雑になってしまう。

それでもクォークとグルーオンの相互作用については，理論的にも，実験的にも，かなり多くのことがわかっている。3つの重要な概念を紹介しよう。これらの概念は，お互いに無関係ではない。1つめが閉じ込め概念，次が漸近自由性，3つめはスケーリングだ。

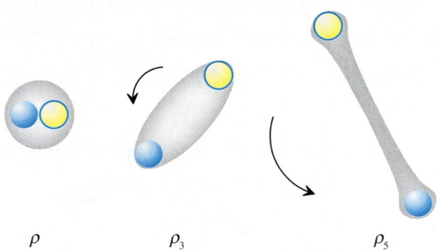
11.2 閉じ込め

グルーオンの間にはたらく長距離力については，理論的には，手のつけようがない。単に複雑で始末に負えないだけでなく，新たな無限大まで出現するためである。グルーオンは光子と同じく質量をもたないが，長距離まで届くグルーオン場は存在しないようである。相互作用しながら長距離まで届く場があるとすれば，エネルギーは無限大になってしまうと考えられている。では，物理的な粒子として外に出てくる粒子は，すべて色をもたないと仮定しよう。そうすれば，遠くまで届くグルーオンの場も出てこない。例えるなら，もし光子で同じような問題が起きたら，遠くまで届く電場をつくらないように，電気的に中

性の粒子だけしか存在しない，と考えるようなものだ。つまりクォークの束縛状態は，色の組み合わせが「無色」になるものしか存在しない。例えば，赤いクォークと反赤クォークの束縛状態である。クォークが3個の場合にも，3つとも異なる組み合わせ，つまり，赤，緑，青の組み合わせは白色になるため，長距離のグルーオン場をつくることはない。うまい具合に色の名前をつけたものだと感心する。光の場合には赤，緑，青の3色を組み合わせると白色光になるが，同じようなことがQCDでも成り立つ。この組み合わせになるとどうして長距離のグルーオン場をつくらないか，不思議に思うかもしれない。その点を説明するためには数式が必要である。陽子や中性子は，色が異なる3種類のクォークの束縛状態と考えられている。クォーク間距離に比べて遠いところでは，クォークのこの組み合わせから放出されたグルーオンは，互いに打ち消しあってしまう†。

つまり，クォーク1個だけを陽子から引き離すことはできない。仮に引き離したとすると，1個のクォークと2個のクォークが互いに遠く離れて存在することになるが，どちらも無色にはなりえないので，単独で存在することはできない。引き離し続けるためには，無限のエネルギーが必要になるだろう。つまり閉じ込めとは，3個のクォークがお互いの近くに閉じ込められている状態を指す。

ある程度の賛同は得られているとはいえ，閉じ込めは理論的に厳密に証明されているわけではない。第8章で議論したクォークの束縛状態の，要点を思い出してみよう。素粒子物理学者は，グルーオンはグルーの一形態だとイメージ



† （訳者注）電荷をもつ物体は遠くまで届くクーロン場をつくるが，プラスとマイナスの電荷が打ち消し合う中性の物体の場合にはクーロン場が打ち消し合うようなもの。

している。クォークが遠く離れると，その間にグルーの紐ができる。さらに，クォークはお互いの周りを回転することもできる。しかし，このイメージはあくまでも希望的観測であって，実験で確かめられているわけではない。あまり文字どおりに受けとめないでほしい。前の図は，束縛状態と回転によって，グルーのひもが伸びて大きなエネルギーをもつ束縛状態を示している。

この図では，青の枠の付いた黄色は反青，つまり白から青を除いた色を表す。黄色は赤と緑を同じ量だけ含み，青を含まない。もちろん，白は赤，緑，青を等量含む。

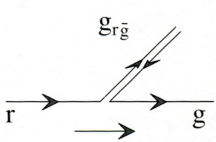
アップやダウンクォークの束縛状態の質量については，ほとんどがグルーオン場のエネルギーなのは明らかである。クォークの質量は非常に小さいから。

11.3 漸近自由性

序論で述べたように，結合定数が大きすぎるので，クォークとグルーオンの相互作用に摂動論は使えない。だが，喜ばしいことに，結合定数は一定ではなく，エネルギーに依存する。しかも高エネルギーでは，エネルギーが増加するにつれて，結合定数がだんだん小さくなる。この事実は漸近自由性とよばれている。ヒュー・ポリツァー(Hugh Politzer)，デイヴィッド・グロス(David Gross)およびフランク・ウイルチェック(Frank Wilczek)の理論的研究により，素粒子物理学の世界では，量子色力学が強い相互作用の理論として認められるようになった。

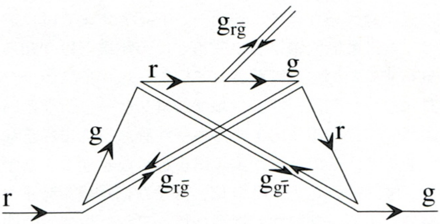
では，この事実をどのように理解したものだろうか？　かなり複雑なので，読者にそのまま受け入れてもらうのがよいかもしれない。だが，まずは説明を試みよう。少なくとも原因については記述しておこう。これは放射補正という問題なのである。

下図のようなアップクォークとグルーオンの相互作用を考えよう。



赤(r)のアップクォークは赤−反緑($r\bar{g}$)のグルーオンを放出し，緑(g)のアップクォークに変わる。この相互作用に対応する結合定数はα_{qcd}とよばれるが，エネルギーが低いときには1程度の大きさになる。

このダイヤグラムに加えて，終状態(赤−反緑グルーオンと緑のクォーク)は同一で，ほかの部分がかなり複雑なダイヤグラムもある。下のダイヤグラムが一例だ。このダイヤグラムにおいて，実験家が始状態(r)から終状態への変化を観測したとしても，その変化が最初のダイヤグラムに対応するのか，最後のダイヤグラムに対応するのかわからないだろう。実際に，実験で観測するのは両方の和だ。最後のダイヤグラムは，始めのダイヤグラムに比べてたくさんのバーテックスを含むが，それらのバーテックスに対応する結合定数が1程度なので，決して小さくはない。光子が電子と相互作用する場合はまったく違い，同じようなダイヤグラムは少なくとも$\alpha^2 \approx (1/137)^2 \approx 1/18000$だけ小さくなるので，0.01パーセント以下のレベルになる。



上の図は可能な高次のダイヤグラムの例である。左から入ってきた赤いクォークが，赤−反緑のグルーオン(上)を放出し，緑のクォークになって右から出て行く。2本線はグルーオンを示す。実際の色を使うとややこしくなるので，代わりに色を文字で表してある。この他にも可能なダイヤグラムがたくさんある。実際の計算には，それらすべてを取り入れなければいけない。そんなことはとても不可能だろう。しかし，世の中には頭のよい人がいるもので，ある事実を導き出してくれた。実は余分なダイヤグラムの寄与は，始めと終わりのクォークとグルーオンのエネルギーに依存するのである。可能なすべてのダイヤグラムを足し合わせた結果は，非常に簡単に言い表すことができる。すなわち，エネルギーを増やすことは，結合定数を小さくすることと同じ効果をもつのである。このことから，次の事実が導き出せる。例えば，エネルギーが



ジェイムズ・ブジョルケン（James Bjorken, 1934）　1967 年，スラックで理論家として研究していたブジョルケンの下を訪れた実験家が，電子–陽子散乱実験で見つかった驚くべき結果を，どう考えるかと彼に迫った。1967 年までは，電子のエネルギーが増加するにしたがって，散乱断面積は減少するという結果だけが知られており，陽子の中に電荷が一様に分布するためだと解釈されていた。しかしスラックの実験が違う結果を示したのだ。それより少し前に，ブジョルケンはスケーリングという性質を提案していた。この性質によって，入射電子のエネルギーが異なるさまざまな散乱過程を結びつけることができた。そして，この性質が実際に正しく成り立つことが実験で示されたのである。ブジョルケンは，続いて 1967 年に，陽子が何か基本粒子からできていれば，スケーリングが成り立つのではないかと提案した。ブジョルケンの理論はかなり抽象的なものだったが，ファインマンが，非常に簡単で明快なイメージによって，重要な突破口を切り開いた。陽子の中に点粒子があるというイメージである。ファインマンがパートンとよんだその点粒子は，今ではクォークとして知られている。

私が 1963 年にスラックに行った頃，ブジョルケンはドレル（Sidney Drell）と一緒に本を書いていた。かなり長期間にわたって，素粒子物理学の標準的な教科書となった本である。当時，我々の研究室はスラックの工作室に同居しており，低いついたての向こう側では機械をつくっていた。信じられないような騒音だった。ブジョルケンとドレルは，私の部屋の向かいで本について議論していたが，本当に議論が成り立っているのかを疑ったものだ。そのせいで，彼らの本では変な計量（何のことか気にしなくてよい）が使われているのだと思う。私は計算機室に逃げ込んで，複雑な代数計算を行うプログラムであるスコーンスキップをつくっていた。このプログラムで，ファインマン・ダイヤグラムの計算がずいぶん楽になった。

10 GeV の QCD は，結合定数を小さくした場合における 1 GeV のまったく同じ理論と等しい。言い換えると，エネルギーが十分高くなったときの理論は，低いエネルギーの理論で結合定数を十分小さくした理論と等しくなる。その場合には摂動論が適用できるので，ほんの少しのダイヤグラムを考慮するだけで済む。おかげで，摂動論を用いて高エネルギーにおけるクォーク-グルーオンの相互作用を詳しく調べることができるようになった。

11.4 スケーリング

これまで概観してきた発展は，スタンフォード線形加速器センター(スラック)における，電子・陽子散乱実験の観測から始まった。この成果により，1990年のノーベル賞が3人の実験家フリードマン(Jerome Friedman)，ケンドール(Henry Kendall)，テイラー(Richard Taylor)に対して贈られた。この実験では，非常に高エネルギーの電子を用いたが，観測結果は非常におもしろい規則性を示した。専門家はこれをスケーリング則とよんでいる。スラックの理論家ブジョルケンが言い出したスケーリング則によると，電子があるエネルギーをもつときの観測結果は，電子がほかのエネルギーをもつときの観測結果と関係づけることができる。さらに，ブジョルケンはスケーリング則が成り立つのは，陽子の中にもっと基本的な粒子が存在する証拠だと考えた。やや形式的な数学を用いたブジョルケンの証明に対して，ファインマンは，驚くほど簡単なモデルによる説明を行った。ここでは，主な考え方だけを示しておこう。

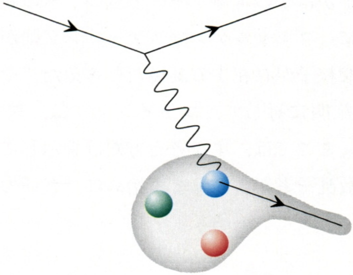
陽子による電子の散乱を考えよう。まず始めに，普通のクーロン散乱である(下図を見よ)。



低エネルギーにおける電子の散乱は，まさに，このような振る舞いを見せる。つまり電子-電子散乱と同じように振る舞う。この電子-電子散乱では，非常に高エネルギーになるまで，ダイヤグラムを1つだけ考慮すればよい(電子の電荷は反対符号だが，この過程では重要ではない。ただし大きさだけは考慮す

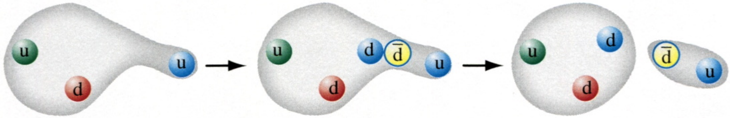
る必要がある)。電磁相互作用の結合定数 $\alpha \approx 1/137$ が非常に小さいので，これより複雑なダイヤグラムを考える必要がない。読者はすでにご存知のはずだが，陽子の中にはグルーオンの海があって，3個のクォークが埋め込まれている。このように複雑な構造の陽子だが，交換される光子のエネルギーが小さいときには，全体としてしか見ないので細かい構造は見えない。だが光子のエネルギーが大きくなると，陽子に侵入して個々のクォークを散乱するようになる。次第に複雑さが増してくるところだ。クォークの周りを囲んで相互作用しているグルーオンの質量も，意味をもつようになる。

漸近自由性が重要になるのはここからである。エネルギーが十分に大きくなると，クォークとグルーオンの結合定数が次第に小さくなるため，クォークは自由粒子のように振る舞い始める。この過程は，電子−電子の散乱とそっくりである(アップクォークとダウンクォークの電荷が，それぞれ $+\frac{2}{3}$ と $-\frac{1}{3}$ という点が違うけれど，この点は簡単に考慮できる)。光子はクォークに衝突してはじき飛ばす。かなり大きな衝撃を受けたクォークは，しばらくの間自由粒子のように飛んでいく。



はじき飛ばされたクォークは，散乱が終われば結局は閉じ込められる。つまり，しばらくすると捕まってしまう。さらに，はじき飛ばされたクォークは陽子を複雑に引き裂くが，その詳細はまだ定量的には理解されていない。例えばグルーオンは，短時間ならば適切な色のクォークと反クォーク対になることができる。反クォークがはじき飛ばされたクォークと結びつき，例えば無色の π^+ となって，閉じ込められずに飛び出してくることもある。

次の図は陽子が中性子と π^+ に分かれる様子を表している。はじき飛ばされたアップクォークを，例えば青のアップクォークとしよう。グルーオンから対生成でつくられた $d\bar{d}$ は，青と反青(＝黄色)になる場合がある。この反青の $\bar{d}$ クォークと，はじき飛ばされた青のアップクォークが結びつくと，無色の π^+ ができる。

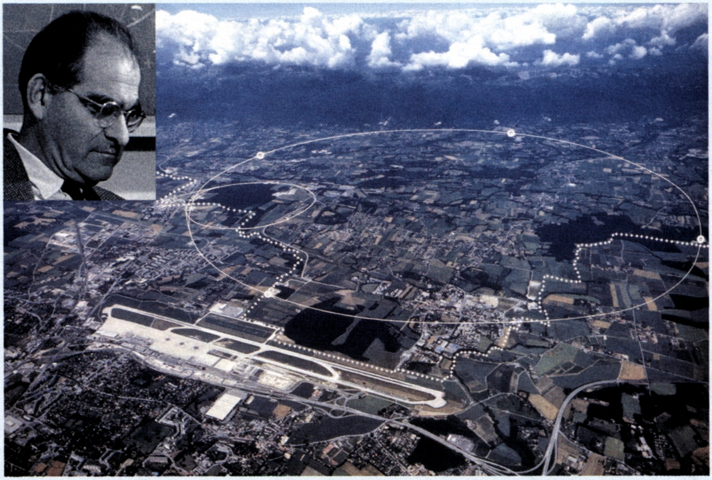


次のように考えるとよいだろう。高エネルギーでは，クォークは自由粒子のように振る舞う。だからブジョルケン-ファインマン流にスラックの実験を解釈すれば，クォークの実在を示していると考えられる。粒子動物園でわかった対称性を説明するための，むしろ抽象的な数学的実在だったクォークは，正しく解釈すれば，スラックの実験によって初めて実在の粒子となったのである。続く量子色力学における漸近自由性の発見により，QCD はクォークとグルーオンの正しい相互作用であることが判明した。すべての理論の中で，この理論だけが漸近自由性をもつ。さらに，低エネルギーで相互作用が強くなるという性質のおかげで，定性的にではあるが，閉じ込めを理解することもできるのである。

12 むすび

素粒子理論に関する第9章は，おそらく，この本のもっとも重要な部分である。だが，多くの読者にとっては，もっとも難しい部分だったのではないだろうか。第9章では，素粒子間の力の問題を論じ，標準モデルの微妙なバランスについても議論した。ある散乱の過程から話を始め，新たな可能性を得るために，新しい粒子を導入する必要があったことについて述べた。さらに，うまい具合に力を釣り合わせることによって，悪い振る舞いがどの過程においても生じないようにできるようになった。Wを含む過程を調べることで，Z^0の必要性も明らかになった。そして，W-W散乱に残った悪い振る舞いを打ち消すために導入したのが，ヒッグス粒子である。「悪い振る舞い」が実在するかどうかは，実験的な検証によって確かめることができる。Wを対生成する過程におけるエネルギー依存性を，実験的に調べればよい。もしヒッグス粒子が見つからなければ，自然がどのようにしてこの問題を解決しているのかを示していけばよい。研究の面白味はそこにある。つまり，自然界には何かほかのうまい仕組みがあるということだろう。その仕組みを探ることによって，その他のさまざまな事柄についても，さらに深い洞察が得られるに違いない。

これまでのところ，標準モデルは実験的に確立されている。ジュネーブにあるセルンの大型電子-陽電子コライダーLEPでは，いろいろな反応に対するたくさんの精密実験が行われた。すべての結果は，実験誤差の範囲内で理論と一致している。シカゴにあるフェルミラボではトップクォークが発見され，その質量は，精密実験で得られたデータをもとに予測した値と正確に一致した。だが我々は，自分たちの理解の限界を正しく認識することを忘れてはいけない。



ジュネーブにあるセルンの航空写真。手前に見えるのがジュネーブ空港の滑走路。波線がスイスとフランスの国境線を示している。2 つの円は，加速器を収めた地下トンネルのある場所を示す。直径 8.5 km の大きな円には，LEP（大型電子-陽電子コライダー）が入っていたが，今は取り除かれて LHC（大型ハドロンコライダー）が建設されている。この加速器が，今後 10 年間の期待を一身に背負っている。

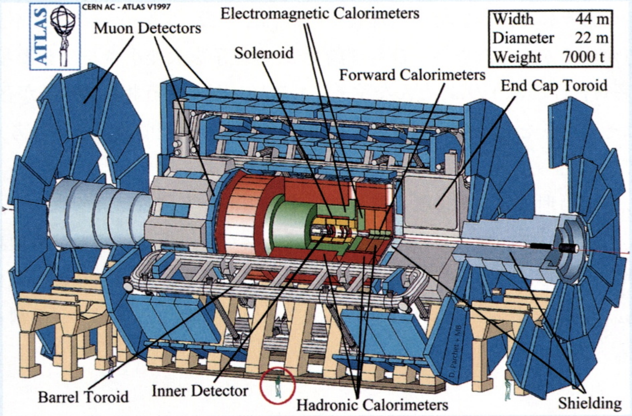
セルンは小さな円と大きな円が交わるあたりに位置している。直径 2 km の小さな円のトンネルには，SPS（スーパー陽子シンクロトロン）が入っている。セルンには，直径 200 m の PS（陽子シンクロトロン）や，同じ大きさの ISR（30 GeV 陽子の交差型蓄積リング）など，もう少し小さな加速器もあるが，図には示していない。

セルンは所長を中心とする役員会によって運営されている。私が 1961 年にセルンに行った頃には，ヴィクトル・ワイスコップ（Victor Weisskopf，1908-2002，上の写真）が所長だった。私見だが，1 番よい所長だったように思う。ISR と SPS の建設を主導したのも彼である。ワイスコップは，ローマ法王庁の科学アカデミー会員だった。核兵器削減に関する彼の意見が法王に取り上げられたとき，淡々として，法王がウィーンのユダヤ人の意見を取り入れるとは驚きだと語った。

セルンでは，ヨーロッパのセルン加盟国代表からなる理事会が年に数回開かれて，政策や財務などについて協議している。理事会の諮問機関である SPC（科学政策委員会）のメンバーは，物理学上の功績によって選出される。最初の頃は，ハイゼンベルクもこの委員会の一員だった。私も 70 年代後半に委員となり，カビボ，テレグディ，ダリッツ等とともに，LEP 建設を推進した。

たぶん，最大の謎は，クォークとレプトンが3世代ずつあるという驚くべき事実だろう。なぜこうなっているのか説明できる人は誰もいない。だが，3世代より多くの世代は存在しないことは間違いないだろう。もっとも明確な証拠は，Z^0 崩壊の測定結果から得ることができる。崩壊産物の質量の和は Z^0 の質量より軽くなる。もし第4世代があって，そのニュートリノの質量が0か非常に軽ければ，Z^0 はそのニュートリノ-反ニュートリノ対に崩壊することができるはずだ。だが実験的には，Z^0 のすべての崩壊は第4世代のニュートリノなしで説明されており，新しいニュートリノが入り込む余地はない。

クォークやレプトンが3世代だけで，それ以上はなさそうだということは，これらの粒子がなにかの束縛状態であるという可能性を排除しているようである。周期律表とはまったく異なる振る舞いだ。周期律表に現れる多様な元素は，陽子，中性子と電子のいろいろな束縛状態に対応している。このようにしてできる束縛状態は，無限に存在するだろう。陽子や中性子を付け加えることで，際限なく新たなものをつくっていけるからだ。92個以上の陽子を含む元素は不安定にはなるが，作成自体は可能である。やはり3世代の粒子を，さらに基本的な粒子の束縛状態と考えるのは，ほぼ不可能だろう。そのうえ，質量がほとんど0であるニュートリノは束縛状態とは考えにくい。この問題を実験的に研究するためには，どんな工夫をすればよいのだろうか？　誰にも答えはわからない。だが，すでに述べたように，標準モデルにはヒッグス粒子という不思議な代物が存在している。この粒子はいまだに見つかっていない。そして，その理論的性質にも未解明な点が多い。特に，理論から予測される重力との相互作用は，現在観測されている宇宙と大きく矛盾する。重力自体についてもわからないことが多い。おそらく，これらの問題はすべてお互いに関連しあっているのだろう。ヒッグス粒子について非常に綿密に調べたら，これらの問題を解決する手がかりをつかむことができるかもしれない。とにかく，未来に期待しよう。ヒッグス粒子の研究は，現在建設中の加速器(LHC はジュネーブのセルンに建設中の 14 TeV の陽子-陽子コライダー)，または計画中の加速器(ハンブルグのデジーで計画している TESLA やセルンで計画している CLIC はどちらも電子-陽電子のリニアコライダー)によって，おおいに進展するに違いない。おそらく10年後には，自然の女神はベールをもう少しだけもち上げて，そのすばらしい秘密を我々の前に垣間見せてくれるであろう。



LHC のために建設中のアトラス(ATLAS)測定器の見取り図。2007 年に稼動開始予定。大きさを比較するために，下のほうに人間を赤丸で囲んでおいた。特定の粒子を検出するために，多種多様な検出器が取り付けてある。例えば，光子と電子を検出するのは，電磁カロリメーター(Electromagnetic Calorimeter)だ。平行な鉛の板でできており，間には液体アルゴンが満たしてある。アルゴンを通過する荷電粒子が原子をイオン化する。そのときに生じる自由電子が電場に引き寄せられて電極に集まるので，電流が流れる。また，パイ中間子や陽子などを測定するための，ハドロン・カロリメーター(Hadronic Calorimeter)も付いている。こちらは，鉄の間にプラスチック・シンチレーターがはさんである。荷電粒子がシンチレーション物質中に入ると光を出し，その光を光検出器で測定する。内側の測定器(Inner Detector)には，半導体の薄片(コンピューターのチップと同じ)と，直径 4 mm の中空の細い管が数十万個収められている。管には気体が充満されており，中心には電線が通してある。どちらの測定器も，荷電粒子が通過したときにできるイオンを用いて，粒子の通過を記録する。ミューオンはアトラス測定器の外側に取り付けた検出器(Muon Detector)で検出するが，こちらも同じ原理である。トロイド(Toroid)とソレノイド(Solenoid)はどちらも磁場を発生させるコイルだ。ソレノイドはビームの走る管を取り巻く 8 個のコイルだが，その内のひとつであるバレルトロイドコイル(Barrel Toroid)を図示してある。アトラス測定器建設に携わっている科学者は 2000 人程度で 150 以上の大学から集まってきている。これほど大きな共同実験になると，共同作業の社会学も大変だ。大規模実験の面倒な側面である。予算獲得のための闘争も必要だ。米ドルで 320 000 000 ドルを上る巨額な経費が必要になると思われている。火星探索機を送り込むための NASA の努力を彷彿とさせる。

読者の方々には，本書でひも理論や超対称性を扱っていないことを不思議に思う方がいるかもしれない。ひも理論では，素粒子を大変小さなひもと考える。一方，超対称性というのは，どんな粒子にもスピンが $\frac{1}{2}$ 違う相棒の粒子が存在し，理論はその粒子を入れ替える大きな対称性に対して不変であるという考え方のことである[a]。

この本は物理に関する書物だ。だから本書で取り上げる理論的概念は，実験的事実に基づいていなければならない。残念ながら，超対称性やひも理論はこの基準を満たしていない。理論の世界の空論にすぎない。パウリの言葉を借りるなら，間違ってすらいない。本書には，そのようなことにページを割く余地はない。

[a] 整数スピン $(0, 1, 2, \cdots)$ をもつ粒子をボソンとよび，半整数スピン $(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \cdots)$ をもつ粒子をフェルミオンとよぶ。超対称性はボソンとフェルミオンを混ぜ合わせる対称性だ。

訳者あとがき

本書はゲージ理論のくりこみで有名なマルティヌス・ヴェルトマンの著書，**Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics（World Scientific, 2003）**の翻訳である。オランダ人の発音を聞くとフェルトマンとも聞こえるが，この本ではヴェルトマンと表記した。原著ははじめ英語で出版されたが，その後オランダ語や中国語に翻訳されている。オランダ語訳用に加筆修正された英語版原稿に，さらに加筆したものが本書の原本となっている。

1931年にオランダのワアールワイクに生まれたヴェルトマンは，ユトレヒト大学で学位を取った後，スイスのジュネーブにあるセルンで研究員となった。その後ユトレヒト大学の物理学教授に就任し，大学院生のヘラルディス・トホーフトとともに，電弱ゲージ理論の量子論を完成させた。そして2人は1999年のノーベル物理学賞を受賞する。

この本は素粒子物理学の現状についての一般向け入門書である。高等学校1年程度の理科の知識があれば素粒子の世界にふれられる。なんと言っても一流の理論家によって書かれたものである。専門家にとってもはっとするような記述も多く，広い範囲の読者が楽しめる内容となっている。物理学科の大学院程度に向けた高度な内容を，数式の代わりに図を多用することによってうまく紹介しているのではないだろうか。

また，本書には素粒子物理学を発展させた人々にまつわるエピソードが散りばめられている。写真のページだけでも十分楽しめるだろう。ただ著者も書いているように，取り上げられている物理学者は著者の視点で選んだものであり，どうしても欧米中心となっている。それでも，湯川秀樹，小林誠，益川敏英，西島和彦，小柴昌俊，福井崇時，宮本重徳，南部陽一郎，原康夫，朝永振一郎の諸氏が登場するのは日本人としては喜ばしい。ほかの日本人の貢献についても一部訳者注で補った。

この本の構成は一風変わっている。第1章で用語の説明が行われると，第2章では一気に素粒子の標準モデルが登場する。そして量子力学と相対性理論の

エッセンスが述べられるのが第3章と第4章である。第5章と6章では素粒子の測定装置と実験装置について簡潔に説明されている。理論物理学も実験に基礎を置いているという，著者の信念の表れであろう。若いポスドクとしてセルンのニュートリノ実験に関わった著者の青春時代が生き生きと描かれている第7章を経て，第8章では1960年代初頭に新しい粒子が次々と見つかり，クォークモデルで整理されていく過程が扱われている。そして第9章のテーマが著者のノーベル賞に繋がったゲージ理論のくりこみである。この章は少し難しいが，ヴェルトマンでなければ書けない味わいがある。第10章では，すべての質量の起源であるヒッグス粒子の謎に焦点が当てられる。第11章には2004年度のノーベル物理学賞の対象となった量子色力学について要領よくまとめられている。第2章まで読まれた読者は，いきなり現れた標準モデルにびっくりせずに，後に説明が続くので，以後の章を読み進んでいただきたい。

素粒子を記述する言葉は，相対性理論と量子論を融合した場の量子論である。現在の標準モデルは，ゲージ理論と対称性の自発的破れという2つのアイデアを基礎としてつくりあげられている。ゲージ理論のくりこみを研究したのがヴェルトマンであり，対称性の自発的破れを研究したのが南部陽一郎である。この本でも述べられているように，1960年代は場の量子論が捨て去られたときであった。新しい現象が次々と見つかる一方で，場の量子論にはまったく予言能力がなかったからであろう。実は，南部が対称性の自発的破れというアイデアを提案したのもやはり1960年代初頭である。南部のアイデアは，あまりに時代に先んじていたためにほとんど注目されなかった。そして，ヴェルトマンがゲージ理論のくりこみに挑んでいた1960年代後半には，すでにほとんどの人が場の量子論を放棄していた。南部が誰も来ない荒野にひとり立つ予言者ならば，ヴェルトマンは誰もいなくなってしまった荒野にひとり残った伝道師であろうか。

ヴェルトマンは質量をもつゲージ場を計算可能な理論にしようと努力していた。そして独自の理論形式をつくりあげ，たったひとりでゲージ理論のくりこみに挑戦していたが，どうしてもうまくいかなかった。そこに現れたのが大学院生のトホーフトである。ヴェルトマンが用意した理論で武装したトホーフトは，対称性の自発的破れを利用してゲージ場に質量を与えれば，質量をもつゲー

ジ理論がくりこみ可能であることを証明した。ヴェルトマンの頑固なまでの方向性と，トホーフトの輝く才能が最高の組み合わせとなって大輪の花を咲かせたのである。これによってゲージ理論への信頼が回復し，世界中の物理学者が場の量子論へと戻ってきた。

この世界を支配するのは，電磁気力，弱い力，強い力，重力の4つの力である。このうち，電磁気力と弱い力を融合した電弱ゲージ理論はトホーフト-ヴェルトマンの研究によってくりこみ可能となった。強い力は非可換ゲージ理論であるという南部の早すぎた提案も，同じくくりこみ可能であることがわかり，量子色力学とよばれるようになった。量子色力学が漸近自由であることを示したグロス-ウィルチェック-ポリツァーは2004年度のノーベル物理学賞に輝いた。

電弱ゲージ理論と量子色力学を融合した統一理論では，陽子も崩壊することが予言されているが，いまだ陽子崩壊は観測されていない。トホーフトやヴェルトマンらの努力もむなしく，アインシュタインの重力理論はくりこみができない。重力を含む統一理論として，素粒子は点ではなく弦だと考える超弦理論が有望であるが，残念ながら実験的証拠を得るに至っていない。

2008年には世界最大の加速器LHCがヒッグスの謎に迫る実験データを出しはじめるはずである。ヒッグス粒子が見つかっても見つからなくても，いまだ見ぬ世界からのメッセージが，素粒子世界の新しい時代の幕開けを告げるだろう。そのメッセージを理解する手助けとなることを願って，この本の翻訳に取り組んだ。専門用語の日本語訳は，原則として培風館の物理学辞典に従った。浅学の徒の翻訳であるが，諸賢の叱責を乞う。

最後になったが，訳者らの遅筆の故に迷惑をおかけしたにもかかわらず，松本和宣氏はじめ培風館の方々に辛抱強く励まして頂いたことに感謝する。

2007年5月

東島 清，東島 仁

索　引

人　名

欧　文

あ　行

か　行

な 行

は 行

ま 行

や 行

ら　行

わ

訳者略歴

東島　清
ひがし じま　きよし

1948年生まれ
1970年　京都大学理学部卒業
理学博士(京都大学)
東京大学助手,
高エネルギー研究所助教授,
大阪大学教養部教授,
理学部教授等を経て
現　在　大阪大学大学院理学研究科教授

専門は理論物理学(素粒子論)

東島　仁
ひがし じま　じん

1978年生まれ
2001年　慶應義塾大学文学部卒業
慶應義塾大学大学院社会学研究科修士課程修了,
京都大学大学院生命科学研究科修士課程修了
現　在　京都大学大学院生命科学研究科博士後期課程在学中

専門は生命倫理, 科学コミュニケーション, 実験心理学

2007年7月25日　初版発行

素粒子世界における事実と謎

原著者　M. ヴェルトマン
訳　者　東島　清
　　　　東島　仁
発行者　山本　格

発行所　株式会社　培風館
東京都千代田区九段南4-3-12・郵便番号102-8260
電話(03) 3262-5256(代表)・振替00140-7-44725

中央印刷・牧製本

PRINTED IN JAPAN

ISBN978-4-563-02283-9 C3042